



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería de Transporte

DESARROLLO DE HERRAMIENTAS SIG PARA LA EVALUACIÓN DE REDES

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:

Ricardo Montoya Zamora

Dirigido por:

José Antonio Romero Navarrete

SINODALES

Dr. José Antonio Romero Navarrete
Presidente

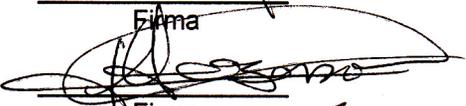
Dr. Alejandro Alfredo Lozano Guzmán
Secretario

Dr. Eduardo Betanzo Quezada
Vocal

Dr. Carlos Santiago López Cajún
Suplente

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruíz
Director de la Facultad


Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y
Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Agosto de 2011
México

RESUMEN

En conjunto con los estilos de manejo de los transportistas y de las condiciones de congestión de las redes de transporte carretero, las características topológicas y topográficas de tales redes inciden sobre la cantidad de emisiones vertidas a la atmósfera y sobre el deterioro mismo que sufrirán los pavimentos de la red. Es importante por lo tanto, contar con herramientas metodológicas que permitan, por un lado, caracterizar dichas redes en términos de su impacto ambiental y del daño que sufrirán sus pavimentos, ello en función no sólo de sus características físicas sino de cómo son usadas. Por otro lado, resulta también importante contar con una técnica que permita ubicar de manera óptima en las redes, los dispositivos para captar información acerca de las mismas. Al respecto, y para darle realismo a la adquisición de datos de la red, el criterio para definir la ubicación de dispositivos de medición en la ésta deberá tomar en cuenta el nivel de congestión de la misma. En esta tesis se proponen herramientas de información geográfica para caracterizar las redes viales en términos de su impacto ambiental y del daño potencial que sufrirán éstas, como consecuencia tanto de su diseño como del estilo de manejo aplicado. Tal información geográfica se emplea asimismo para establecer los lugares óptimos en la red para colocar instrumentos de caracterización de la misma. La caracterización de la red se basa en formulaciones empíricas del consumo de combustible y del daño a pavimentos, que toman información de posicionamiento global (GPS) para evaluar el impacto ambiental y de daño a las infraestructuras. Dicho esquema resulta híbrido al tomar datos GPS de campo para alimentar modelos matemáticos para simular el impacto ambiental de los vehículos y el daño de las infraestructuras. Se asume en este caso que las emisiones contaminantes están ligadas de manera directa con el consumo de combustible, y que la simulación de un vehículo genérico puede proveer los datos para realizar las caracterizaciones. Por cuanto a la localización óptima de los instrumentos de caracterización en la red, se propone una aproximación original, basada en estrategias evolutivas, la cual toma en cuenta el nivel de congestión de la red, encontrando que la característica física del tiempo de viaje en un arco está relacionada con la localización de los instrumentos. Los resultados de estas herramientas con relación a una red y tramo carretero, permiten obtener una medida del impacto que tiene el estilo de manejo sobre el daño a las infraestructuras e impacto ambiental, al tiempo de ubicar de manera óptima los instrumentos de caracterización de la red. A partir de las formulaciones aplicadas para la caracterización de la red se desarrolla un soporte lógico, diseñado para visualizar tanto los datos GPS de entrada como las salidas pertinentes para evaluar el impacto ambiental y de tarificación vial del tráfico.

(Palabras clave: tarificación al camino, tarificación al medio ambiente, estrategias evolutivas, localización de sensores, SIG, GPS).

SUMMARY

In addition to driving styles and congestion levels in road networks, topologic and topographic properties of such networks influence emissions to the environment and the intrinsic damage that the infrastructure pavements will suffer. It is consequently important to have methodological tools to, on the one hand, characterize such networks in terms of their environmental impact and infrastructure damage, as a function not only of their physical characteristics but of how they are used. On the other hand, it results also important to have a technique to optimally locate within road networks, those instruments intended to characterize them. In this respect, a realistic approach for this location criterion shall take into account the congestion levels exhibited by the network. In this thesis geographic-information- based tools are proposed aimed at characterizing road networks in terms of their environmental impact and intrinsic pavement damage, as a consequence of both the network design and driving styles. Such geographical information is also used to define the optimal location of characterizing instruments in the network itself. Characterization of the network is based upon empirical formulations regarding fuel consumption and pavement damage that take global positioning information (GPS) to assess the environmental impact and infrastructure damage. Such scheme results hybrid as it takes GPS data as mathematical models inputs to simulate environmental impact and infrastructure damage. It is assumed in this case that emissions are directly linked to fuel consumption, and that the simulation of a generic vehicle can provide with data to perform characterizations. As far as the optimal location of the instruments with the network is concerned, it is proposed an original approach, based upon evolution strategies which take into account network's congestion level, finding that the physical characteristic regarding the travel time in an arc, is related to the location of the instruments. Outputs from such tools in relation with a road network and segment allow getting a measure of the impact of driving style on pavement damage and environmental impact, while providing the optimal location of network characterizing instruments. From these characterizing formulations a logical support is developed, intended to visualize GPS input data and pertinent output variables to assess traffic's environmental impact and road pricing.

(Key words: Road pricing, environment pricing, evolutionary strategies, sensor location, GIS, GPS).

A Rosario por todo el apoyo y amor que me brindaste
A Leonardo Said por ser el motor en nuestras vidas
A mis padres José e Irma por el apoyo y cariño que me brindaron en esta etapa
A mis hermanas Norma y Miriam por su apoyo y cariño
A Hebe Zoe como ejemplo para su vida
A Dios por permitirme alcanzar este objetivo

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. José Antonio Romero Navarrete por mantenerse firme en sus enseñanzas y por todo el apoyo, esfuerzo y los consejos que me brindó.

Al Dr. Alberto Mendoza Díaz por el esfuerzo y apoyo brindado.

Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz por su confianza y apoyo.

A mis profesores por el conocimiento que me han transmitido.

Al CONACYT por el apoyo brindado durante mis estudios.

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de cuadros	viii
Índice de figuras	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Tarificación del camino	5
1.2 Tarificación del medio ambiente	7
1.3 Localización de sensores	8
1.4 Tendencias de los SIG	12
1.5 Necesidades de investigación	13
1.6 Justificación	14
1.7 Descripción del problema	15
1.8 Hipótesis	16
1.9 Objetivo general	17
1.10 Objetivos específicos	18
1.11 Metodología	18
1.12 Resultados esperados	19
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA	21
2.1 Cronología de herramientas para ubicar sensores	21
2.1.1 Modelos determinísticos	23
2.1.2 Modelos estocásticos	32
2.1.3 Simulación	34
2.2 Deterioro de la infraestructura causada por vehículos	35
2.2.1 Tarificación en el camino y en el ambiente	36
2.2.2 Valoración y cargo del daño al pavimento y el GPS	38
2.2.3 Temas concernientes a los datos GPS	39
2.2.4 Modelo del Banco Mundial	40

2.3 Efecto ambiental causado por los vehículos	45
2.3.1 GPS y emisión de contaminantes	46
2.3.2 Emisiones del vehículo y estilos de manejo	47
2.3.3 Modelado de las emisiones vehiculares	47
2.3.4 Modelado con Mobile 6	48
2.4 Discusión	51
3. DESARROLLO DEL SIMULADOR Y DEL MODELO DEL EFECTO AMBIENTAL Y DAÑO AL PAVIMENTO	54
3.1 Descripción del modelo	56
3.2 Datos GPS	56
3.3 Diagrama de bloques del modelo propuesto	57
3.4 Modelado del impacto ambiental de los vehículos	58
3.5 Respuesta vehicular a la aceleración longitudinal y lateral	59
3.6 Sistematización	66
3.6.1 Consola de EJS	68
3.6.2 Interfaz de usuario de EJS	69
3.7 Ejemplo de aplicación en carretera	71
3.8 Ejemplo de aplicación en zona urbana	78
3.8.1 Tarificación del ambiente y del camino	83
3.8.2 Discusión	84
4. MODELO DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE SENSORES EN UNA RED	87
4.1 Descripción del modelo	87
4.1.1 Solución con enumeración implícita	88
4.2 Análisis de algoritmos	89
4.3 La computación evolutiva	90
4.4 Comentarios	91
4.5 Descripción del modelo	91
4.5.1 Funciones de penalización	92
4.5.2 Penalización con base en la factibilidad	93
4.5.3 Selección de padres por torneo	94
4.5.4 Cruzamiento en dos puntos	95
4.5.5 Mutación por intercambio recíproco	95
4.5.6 Selección de supervivencia	95

4.6 Análisis de la red	96
4.7 Resultados	98
4.8 Discusión	112
4.9 Aplicación de ambas metodologías	116
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
5.1 Trabajo futuro	121
LITERATURA CITADA	122
APENDICE A	134
APENDICE B	139

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Clasificación vehicular en Mobile 6 utilizada por la EPA	50
2.2	Datos de entrada para estimar emisiones contaminantes con Mobile 6	50
3.1	Datos de salida del GPS	57
3.2	Propiedades del vehículo	62
3.3	Vialiades primarias y secundarias dentro de la zona urbana de Querétaro	79
4.1	Corridas realizadas para resolver el NSLP utilizando EE	104
4.2	Tiempo de cálculo de los procesos realizados antes de resolver el NSLP utilizando diferentes técnicas	105
4.3	Tiempo de cálculo de los procesos utilizados para resolver el NSLP en cada una de las diferentes técnicas utilizadas	106
4.4	Tiempo de cálculo de los procesos realizados posteriormente a la solución del NSLP en cada una de las técnicas aplicadas	106
4.5	Tiempo total del proceso para resolver el NSLP utilizando diferentes técnicas	106
4.6	Indicadores topológicos encontrados en la red urbana de Querétaro	107

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Metodología de estudio conjunto de transporte	5
2.1	Clasificación de metodologías para resolver el NSLP	22
2.2	Resultados de la simulación del daño al pavimento flexible como una función de la presión de inflado y velocidad del camión (Parker y Hussain, 2006)	37
2.3	Relación entre la velocidad del vehículo, la potencia del motor y el consumo de combustible	42
3.1	Diagrama de flujo para el modelado de la tarificación al camino y al medio ambiente	57
3.2	Diagrama de fuerzas y aceleraciones en un vehículo genérico	59
3.3	Representación diagramática del modelo de balanceo y rebote en pendiente del vehículo	60
3.4	Representación diagramática de un modelo simplificado de pavimento flexible (Romero y Lozano, 2006)	63
3.5	Deformaciones de cizalladura y normal en un elemento del pavimento	63
3.6	Derivación del recorrido instantáneo del radio de curvatura	65
3.7	GPS Garmin Oregon 550	67
3.8	Interfaz de usuario del simulador desarrollado durante esta investigación con la herramienta de simulación EJS	68
3.9	Consola de trabajo de EJS	69
3.10	Interfaz de programación de EJS	69
3.11	Segmento de autopista recorrido por el vehículo unitario de dos ejes en México	71
3.12	Distribución espacial a lo largo de una autopista mexicana del consumo de combustible calculado	73
3.13	Distribución espacial a lo largo de una autopista mexicana del daño al pavimento simulado	74
3.14	Datos GPS de la velocidad a lo largo del camino mexicano	74
3.15	Aceleración a lo largo del camino mexicano, calculada a partir de los datos GPS	75
3.16	Variación espacial de la fuerza de arrastre a lo largo del camino mexicano	76
3.17	Variación espacial, a lo largo de la carretera mexicana, de la fuerza de resistencia a la rodadura	76
3.18	Vialidades primarias y secundarias de la red urbana de Querétaro	80
3.19	Cantidad de energía acumulada en las vialidades de la zona urbana de Querétaro	81
3.20	Cantidad de combustible consumido en las vialidades de la zona urbana de Querétaro	82
3.21	Asignación de viajes sobre la Red urbana de Querétaro	83
3.22	Efecto de la velocidad en los parámetros de desempeño (a)	

	Energía en el pavimento; (b) Consumo de combustible	85
3.23	Efecto de la desviación estándar de la aceleración en los parámetros de desempeño (a) Consumo de combustible; (b) Energía en el pavimento	85
3.24	Relación entre los parámetros de desempeño	86
4.1	Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando programación lineal entera	99
4.2	Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando la heurística de Hodgson	100
4.3	Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando la heurística de Ignizio aplicada por De la Lata (1990)	101
4.4	Ubicación de sensores sobre la red de Querétaro, utilizando la metodología de Hu <i>et al.</i> (2009)	103
4.5	Árbol de mínima expansión de la red urbana de Querétaro, con un tiempo total de 61148 minutos	113
4.6	Representación de los viajes de la matriz OD sobre la red utilizando una técnica de asignación denominada Todo o nada	114
4.7	Representación de los viajes de la matriz OD sobre la red utilizando una técnica de asignación denominada Equilibrio del usuario	115
4.8	Relación entre el tiempo de viaje en cada arco y la cantidad de energía aplicada sobre este	116
4.9	Relación entre el tiempo de viaje en cada arco y el consumo de combustible en cada arco	117
4.10	Relación entre el congestionamiento vial y el daño al pavimento aplicado por el paso de los vehículos	117

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día el movimiento de las personas y de las mercancías es muy importante para el crecimiento económico del país. Hablando del movimiento de personas para que la fuerza productiva se traslade hasta donde se produce y se transforma la materia prima; hablando del movimiento de mercancías para que éstas lleguen en tiempo y forma hasta el lugar donde el cliente las necesita.

El crecimiento económico de nuestra nación, medido a través del Producto Interno Bruto (PIB), se debe en parte al valor agregado que tiene el sector terciario, en este caso la calidad del servicio que tiene el transporte para que el producto llegue a tiempo y en las mejores condiciones. En los últimos años se ha mostrado una Tasa de Crecimiento Media Anual (TCMA) del PIB de nuestro país del 3.4%, en donde se destaca que el transporte ha ido a la alza con una TCMA del 3.7%, siendo el cuarto más importante como actividad económica del país. Por ello se considera que juega un papel importante en el desarrollo económico de México (IMT, 2009). Dentro del transporte se destaca el movimiento de pasajeros y de carga a través del autotransporte que en total aportan poco más del 80% del Valor Agregado Bruto (VAB), dejando atrás al transporte aéreo, ferroviario y marítimo (IMT, 2009).

Sin importar el tipo de mercancía transportada pero sí el origen y el destino (importaciones, exportaciones o movimiento doméstico) de la misma, se dan movimientos de carga en miles de toneladas diarias por autotransporte. Gran cantidad de este movimiento de mercancías tiene como destino la Ciudad de México y el Área Metropolitana con un total de 8.851.080,00 y 15.175.862,00 habitantes respectivamente de un total de 112.336.538,00 habitantes en México (21.4%) (INEGI, 2011). Esta demanda de carga genera un tránsito mayor de vehículos pesados (vehículos unitarios y vehículos articulados) en los ejes carreteros que conectan diversos puntos del país, incluidas las fronteras y los puertos, principalmente con la capital y el área metropolitana.

Estos viajes de vehículos pesados generan impactos directos e indirectos a la población cercana a su recorrido, entre ellos se puede mencionar el deterioro de los caminos por el paso de vehículos pesados, la emisión de contaminantes hacia la atmósfera, la contaminación por ruido y el congestionamiento cuando estos vehículos entran en zonas urbanas.

En el paso por las ciudades por ejemplo, el movimiento de pasajeros genera congestionamientos viales en las horas pico y por consecuencia mayor número de emisiones contaminantes, contaminación por ruido y estrés; factores que no sólo afectan al usuario de un automóvil sino al resto de los usuarios y su respectiva zona de influencia. En el movimiento de carga en carreteras, como ya se mencionó, por ejemplo, genera un deterioro hacia la infraestructura que hasta el momento se ha venido solventando mediante tarifas proporcionales al tipo de vehículo y número de ejes. Sin embargo, a pesar del establecimiento de estas tarifas en nuestro país no se tienen penalizaciones por generar congestionamiento vial, por dañar la infraestructura, por generar ruido o por emitir clorofluorocarbonos hacia la atmósfera e incluso por la forma en cómo maneja cada usuario (Boquete, 2010).

Por otro lado, se sabe que el establecimiento de tarifas en los caminos produce una disminución en el número de usuarios (tanto en transporte de pasajeros como de carga) ya que cada uno de ellos percibe el ahorro en tiempo por el camino de cuota de manera distinta a los demás usuarios. El Valor del Tiempo (VOT), el cual es la cantidad monetaria que cada usuario está dispuesto a pagar por ahorrarse una cierta cantidad de tiempo (Torres y Hernández, 2006), define la cantidad de usuarios que circularán por los caminos de cuota o libres de peaje. Este establecimiento de tarifas en los caminos genera un reacomodo en el tránsito que circula por las carreteras con sus respectivos cambios como lo son: disminución del tránsito de vehículos y un incremento en el tránsito en otros caminos (libres de peaje); disminución o aumento de la emisión de contaminantes en los caminos de cuota y los libres de peaje, respectivamente.

Este reacondicionado del tránsito vehicular influye directamente en la planeación de caminos con respecto a la construcción (de nuevas carreteras o libramientos) y conservación (priorización de caminos a los que se les dé mantenimiento) y es por ello que es necesario allegarse de información actualizada de los viajes Origen-Destino (OD) para que a través de la aplicación de técnicas de asignación de tránsito se puedan representar estos viajes y poder estimar la viabilidad de la construcción de nuevos caminos o libramientos.

Dada la necesidad de estudiar estos temas, que han sido estudiados por separado, y de dar una solución a las problemáticas que cada una de estas temáticas presenta surge la idea de desarrollar herramientas SIG como técnicas de apoyo a la toma de decisiones. El término herramienta originalmente se aplicaba a un objeto que era elaborado con el fin de facilitar la elaboración de una tarea mecánica que requiere de la aplicación de energía. Hoy en día el uso de esta palabra tiene otras interpretaciones además de la de herramienta física, tal es el caso de las herramientas informáticas o herramientas de programación que se entienden como aquellos procedimientos, dispositivos o modelos matemáticos que incrementan la capacidad de realizar determinadas tareas (Quintanilla, 1997). Por otro lado el desarrollo de herramientas incluye la generación de software o la programación de módulos dentro del mismo software para la resolución de un problema en específico.

En esta tesis se estudian y se desarrollan herramientas informáticas plasmadas en un SIG que potencialmente pudieran coadyuvar para mejorar el análisis y el uso de las infraestructuras conformadas en redes viales y carreteras, y en cuanto a los medios para caracterizar dichas redes mediante toma de datos de campo capturados a través de sensores y/o levantamiento de encuestas. Asimismo, por cuanto a caracterizar dichas redes en términos de las emisiones contaminantes y consumos de combustible.

En cuanto al uso de las infraestructuras y la evaluación de los efectos externos del transporte se ha acuñado el término “tarificación” (*pricing*) para traducir el daño a las infraestructuras o al ambiente en términos cuantitativos e incluso económicos. Todo esto bajo el criterio de que quien provoca el daño al ambiente o a las infraestructuras, pague por tales efectos. Las dificultades, sin embargo, para evaluar en términos cuantitativos algunas externalidades que son difíciles de evaluar, tales como el ruido o la contaminación ambiental provocadas por el transporte, han provocado que los criterios para estas cuantificaciones se base en criterios indirectos o correlacionados. Por ejemplo, se sabe que el ruido provoca el incremento de la presión arterial de quienes quedan expuestos a tal situación, más su tarificación resulta poco práctica si de tomar la presión de las personas se trata, o de evaluar las consecuencias de tal incremento de la presión arterial en la población (MTDD, 2006). De esta manera, se deben diseñar esquemas alternos en los que de manera indirecta se evalúen tales efectos.

Además, la creciente necesidad de contar con la información actualizada para una correcta planeación, y dado el creciente uso tanto de computadoras como de software especializado conlleva a la utilización de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) como de Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permitan obtener la información adecuada que servirá como información de entrada para cada modelo propuesto en esta tesis.

Se observan entonces tres vertientes respecto a la importancia del estudio del transporte, como se aprecia en la figura 1.1: la primera deriva de la necesidad de evaluar el daño que sufre la infraestructura de transporte; el segundo hace referencia a estimar las emisiones hacia el medio ambiente; y la tercera necesidad referente a la planeación de la infraestructura a través de los modelos de asignación de tráfico. Estos tres temas han sido estudiados por separado y es por ello el interés en conjuntar esfuerzos para el desarrollo de herramientas computacionales SIG que permitan caracterizar y analizar desde distintos enfoques el transporte limitándose exclusivamente al desarrollo de las herramientas SIG que ayudarán a los tomadores de decisiones a la correcta planeación de la infraestructura del transporte.

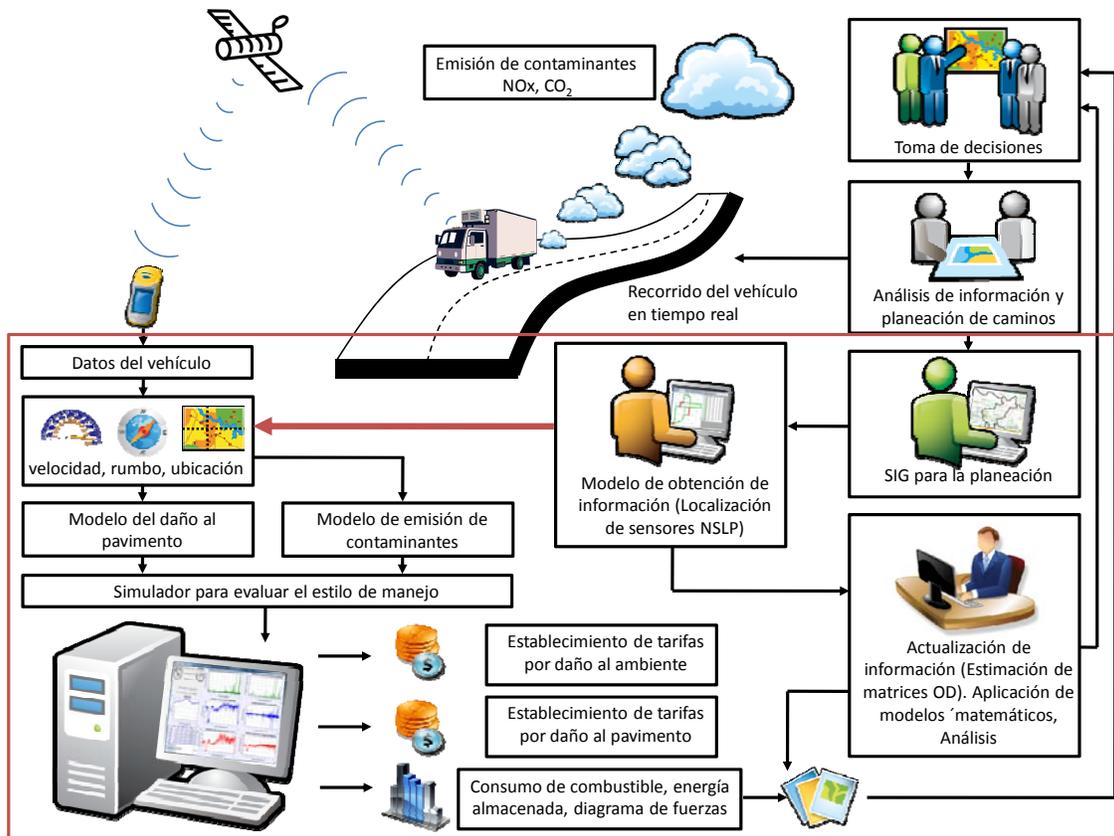


Figura 1.1. Metodología de estudio conjunto del transporte.

1.1 Tarificación del camino

En una primera aproximación simplificada, la tarificación de los caminos puede ser vista como una serie de tarifas que el usuario tiene que pagar para cubrir diferentes costos (Arnold *et al.*, 2010): congestión o el apreciamiento del tiempo de viaje, que busca reducir los tráficos vehiculares en determinadas áreas u horarios; contaminación ambiental, que busca reducir los efectos ambientales del tráfico; y los peajes, que buscan generar ingresos para cubrir los costos de operación. Sin embargo, para la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), la tarificación tiene que ver exclusivamente con los cargos a los usuarios por usar las infraestructuras, en forma de peajes y otros cargos directamente asociados con el uso de los caminos, tales como el cargo por congestión (OCDE, 2006). Por otro lado, sin embargo, una perspectiva más amplia

se ha sugerido para la tarificación del transporte carretero, la cual involucra el concepto de costo en las dos direcciones. Esto es, se incluye el costo de operación de los transportes, los costos de congestiónamiento, los costos de los accidentes, los costos ambientales, así como los costos en la infraestructura (Ozbay *et al.*, 2007). En este contexto amplio, se toma a los costos ambientales compuestos de las emisiones contaminantes y el ruido. Otro concepto aún más amplio ha sido propuesto por Komanoff (1997), el cual toma en cuenta incluso los estilos de manejo y las emisiones en términos de kilómetros recorridos, o aún la probabilidad de que ocurran accidentes cuando se transportan sustancias peligrosas en áreas urbanas (Garrido, 2008).

En este contexto, y a pesar de la evidente preocupación por los efectos ambientales y sobre las infraestructuras, se reporta que las políticas de tarificación en muchas ciudades parece enfocarse de manera exclusiva en los niveles de congestiónamiento y la valoración del tiempo de viaje (Fosgerau y van Dender, 2010).

De esta forma, mientras que las políticas existen en cuanto a la tarificación del camino y del ambiente para disminuir los impactos asociados del transporte, no existe todavía un consenso por cuanto a los conceptos que deben estar detrás de la tarificación del transporte. Ello a pesar de que se ha reconocido la importancia o efecto crítico que sobre la viabilidad de las redes de transporte terrestre tiene un sistema razonable de tarificación del transporte (Martin *et al.*, 2010). Esto en la medida que algunos impuestos al combustible en términos globales no han representado mayores ingresos a las economías como resultado de la mejora en la eficiencia de los motores empleados (Porter y Kim, 2008). Lo anterior no obstante que los efectos positivos de la tarificación han sido caracterizados de manera considerable en diferentes ámbitos. Por ejemplo, los niveles de congestiónamiento disminuyen con esta política (Small, 2004), reportando beneficios netos del orden del 39% respecto a los costos primarios iniciales en los que ocurre el operador de las vías. Arlod *et al.*, (2010) predice reducciones a largo plazo de las distancias recorridas por los usuarios en el rango de 10 a 15 kilómetros, y reducciones del 10% en las emisiones ambientales. Sin

embargo, las dificultades para implementar tales esquemas de tarificación han sido reconocidas desde la perspectiva económica y ambiental (Fosgerau y van Dender, 2010). Por ejemplo, tales resistencias se encuentran en países como México y Estados Unidos, con una menor resistencia en países europeos (Arnold *et al.*, 2010; Bhatt *et al.*, 2009). En tal sentido, de acuerdo con DeCorla-Souza y MacGregor (2009), el vencer la oposición a tales esquemas de tarificación requiere la “exploración y desarrollo de soluciones creativas que sean aceptables al público y que venzan los desafíos por cuanto a la operación y a la seguridad”, lo cual será en extremo desafiante en la medida de que en general los usuarios prefieren en un momento dado, pagar impuestos sobre el consumo de combustible y los kilómetros recorridos (Zmud y Arce, 2008).

Sin embargo, las aproximaciones fallidas y exitosas de tarificación ilustran la necesidad de contar con un criterio de tarificación que sea geográfica y económicamente justo (Taylor *et al.*, 2010). Y la importancia de desarrollar tales políticas de tarificación, en particular en los países en vías desarrollo como México, se reconoce como crítica (Mahendra, 2008), en la medida en que el incremento de la población en tales países impone una mayor presión tanto sobre la economía como el ambiente.

1.2 Tarificación del medio ambiente

Al igual que la tarificación del camino, la tarificación al medio ambiente debe ser visto como un cargo que el usuario de un camino tiene que pagar de acuerdo a la forma en cómo conduce (Boquete *et al.*, 2010). Se sabe que la aceleración y la velocidad de crucero influyen directamente en el consumo de combustible y a su vez en la cantidad de emisiones contaminantes (Handy and Krizek, 2009). De Vlieger *et al.* (2000) encontraron que un estilo de manejo agresivo se refleja en un incremento notable en la cantidad de emisiones comparado con un estilo de manejo normal. Estos autores desarrollan una función general para las emisiones de contaminantes a través de técnicas de regresión no múltiple con la velocidad y la aceleración como datos de entrada de la siguiente manera:

$$E_n(t) = \max[E_0, f_1 + f_2 v_n(t) + f_3 v_n(t)^2 + f_4 a_n(t) + f_5 a_n(t)^2 + f_6 v_n(t) a_n(t)] \quad (1.1)$$

Donde:

$v_n(t)$ es la velocidad instantánea del vehículo n en el tiempo t.

$a_n(t)$ es la aceleración instantánea del vehículo n en el tiempo t.

E_0 es el límite más bajo de emisiones (g/s) por tipo de vehículo

f_1 a f_6 son constantes específicas para cada vehículo y tipo de emisiones.

Uno de las principales debilidades de este modelo es que ha sido probado mediante simulación en redes urbanas y como ellos mismos lo reconocen, el tráfico en las autopistas no ha sido representado con los datos mostrados en el artículo.

1.3 Localización de sensores

Se sabe que los modelos de asignación son utilizados para estimar y pronosticar el flujo vehicular en una red dentro de una zona de estudio, para evaluar mediante ello cambios en la red como son la construcción de nueva infraestructura, la ampliación de carriles en avenidas, o efectuar cambios en los sentidos de circulación de la red (Chin y Hwang, 2006). Como ejemplo de cambios en la infraestructura, productos de estudios de planeación, se puede mencionar el caso de la ciudad de Querétaro que tiene cuatro libramientos: Norte, Noreste, Suroeste y Noroeste (CONCYTEQ, 2001). Por otro lado, se han desarrollado, y utilizado, diversos modelos para representar, con un cierto grado de confiabilidad, el flujo vehicular real en una red carretera. Sin embargo, estos modelos tienen en común que utilizan -como dato de entrada- una Matriz Origen-Destino (OD), la cual representa los viajes entre cada par origen-destino. Desafortunadamente, en la práctica, rara vez se obtienen de manera directa los datos OD, lo que conduce a realizar estudios para estimar dichas matrices, utilizando métodos de encuestas OD y de conteo en carreteras. El estimar una matriz OD mediante conteos en

tramos carreteros resulta ser un método más barato, rápido y conveniente que las encuestas (Friedrich y Wang; 2004, 2005) Es por ello que diversos investigadores han estudiado y aplicado metodologías para disminuir el costo económico de la estimación de matrices OD como lo han hecho: Robillard (2005); Van Zuylen y Willumsen (1980); Hendrickson y Siddarthan (1981); Maher (1983); Bell (1983); Bell (1991); Cascetta (1984); Brenninger *et al.* (1989); Fisk (1989); Yang *et al.* (1991); Nihan y Hamed (1992); Denault (1994); Lo *et al.* (1996); Lo *et al.* (1999); Hazelton (2000); Iannó y Postorino (2002); Friedrich y Wang (2004); y Friedrich y Wang (2005).

Recientemente en nuestro país se han hecho esfuerzos para aplicar éstos y otros modelos para el estudio del transporte de carga como lo han hecho: Valdéz y Mendoza (2002), Centeno y Mendoza (2003), Mendoza *et al.* (2005), Rico (2005). Este tipo de modelos toman en cuenta las características de la red para estimar la representación de los viajes basándose en el modelo de las cuatro fases en los cuales se utilizan formulaciones matemáticas para la estimación de los viajes tanto atraídos como generados, en las diferentes sub-zonas definidas en la zona general de estudio, creando con ellos una matriz origen – destino (OD). A partir de esta matriz y mediante técnicas de asignación de tráfico, es posible repartir y representar los viajes OD en una red de transporte. Esto es utilizado en la planeación de obras civiles, con el objeto de determinar la viabilidad de construir infraestructuras tales como caminos, carreteras, libramientos y pasos a desnivel. Esta viabilidad se define por el tránsito que circulará por la infraestructura a partir del cálculo de la tasa interna de retorno (peaje en el caso de los caminos de cuota) que define, desde el punto de vista económico-financiero, la viabilidad de la construcción del camino u obra en cuestión, pero estos modelos no toman en cuenta las externalidades derivadas del sistema de transporte (Frybour, 1974) solo las características de los viajes y de la red.

Las matrices OD suelen generarse mediante diversas técnicas, en función del medio de transporte. En el caso del transporte de pasajeros, tales matrices se obtienen de encuestas domiciliarias en zonas urbanas, o encuestas realizadas a bordo (Molinero y Sánchez, 1997; Van Zuylen, 1978), mientras que en el caso del

transporte de carga se emplean estaciones de encuesta en los caminos. Estos estudios para la obtención de las matrices OD requieren de una cantidad considerable de recursos humanos y económicos. Por ejemplo, cabe mencionar que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) destinó para la planeación de proyectos en el año 2007, 113,7 millones de pesos para el aseguramiento de calidad de las obras, estudios de aforo, estudios origen destino y estudios técnicos, incrementándose a 247.5 millones para el año 2008 (SCT, 2010). Además, el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) invirtió, en 2006, 2 millones de pesos en un estudio general de licencias (donde se obtuvieron datos del origen, destino y tipo de carga) ubicando 15 estaciones de encuesta sobre la Red Carretera Federal (Mendoza y García, 2006).

Dado que hoy en día se requiere optimizar los recursos asignados a las tareas realizadas en distintas disciplinas, derivado de esto y del gasto reportado en estudios origen destino en nuestro país, se resalta la importancia de desarrollar una metodología y herramienta informática que permita tener un ahorro en el levantamiento no solo de estudios OD, sino de información de diversa índole dentro de la red de carreteras y de las zonas urbanas, para la planeación. Es por ello que diversos investigadores han estudiado, desarrollado y aplicado metodologías para disminuir el costo económico de la estimación de matrices OD como lo han hecho: Robillard (1975); Turnquist and Gur (1979); Van Zuylen y Willumsen (1980); Hendrickson y Siddarthan (1981); Maher(1983); Bell (1983, 1991); Cascetta (1984); McNeil y Hendrickson (1985); Spiess (1987); Cascetta y Nguyen (1988); Brenninger-Göthe *et al.* (1989); Fisk (1989); Yang *et al.* (1991); Nihan y Hamed (1992); Kawakami *et al.* (1992); Nielsen (1993, 1998); Denault (1994); Lo *et al.* (1996, 1999); Hazelton (2000), Iannó y Postorino (2002); y Friedrich y Wang (2004, 2005). Esta estimación de matrices OD se da a través del estudio de la relación entre la distribución de los pares OD y los conteos de vehículos en los arcos de la red.

Uno de los modelos en los que diversos investigadores se han basado para el desarrollo de otros es el modelo de Yang (1991). Dentro de este modelo se emplea el concepto del Error Relativo Máximo Posible (*MPRE*, por sus siglas en inglés). El modelo es simple y es un modelo cuadrático descrito de la siguiente manera:

$$MPRE(\theta) = \max \sqrt{\sum_{w \in W} \theta_w^2 / |W|} \quad (1.2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{w \in W} p_{aw} t_w \theta_w = 0$$

Donde:

$$\theta_w = \frac{d_w^* - d_w}{d_w},$$

d_w^* es el flujo OD estimado,

d_w es el flujo OD medido,

p_{aw} es la tasa de captación de flujo en el arco a y

$|W|$ es el número de pares OD

Dentro de este modelo se considera óptima la ubicación de los sensores cuando el *MPRE* es mínimo, es decir cuando el error entre los viajes asignados y los conteos es el mínimo. El inconveniente al utilizar este modelo se presenta porque es difícil que el planeador elimine los errores en los conteos, suponiendo que el conteo tiene un error (debido a que se toma el promedio de viaje al año), la estimación de la matriz OD a utilizar también lo tendrá por lo tanto el modelo de asignación contará con un error y a su vez la localización de los sensores basada en la captación de flujo también tendrá un error.

1.4 Tendencias de los SIG

Muchas disciplinas se han beneficiado de la tecnología de los SIG, traduciéndose en una reducción de costos y mejoras continuas en diferentes procesos y modelos dada su versatilidad. La aplicación de los SIG en el área del transporte no ha sido la excepción tal es el caso de la aplicación del modelo de las cuatro fases y la logística (De Smith *et al.*, 2007).

Existe una gran variedad de SIG, dentro de los más populares de licencia libre se encuentran: Capaware, GeoPista, Geoserver, GRASS, gvSIG, ILWIS, Generic Mapping Tools, JUMP, Kosmo, LocalGIS, MapGuide Open Source, MapServer, MapWindow GIS, Quantum GIS, SAGA GIS, SEXTANTE y uDIG; mientras que dentro de los SIG con licencia de pago se encuentran: ABACO DbMAP, ArcGIS, Autodesk Map, Bentley Map, Caris, CartaLinx, Geomedia, GestorProject – PDAProject, IDRISI, LatinoGis, Manifold, MapInfo, Maptitude, ortoSky, GESmallworld, SavGIS, SITAL, SPRING, SuperGIS, TatukGIS, TNTMips, y GeoStratum.

Los sistemas mencionados en los párrafos anteriores cuentan con herramientas para el análisis en dos dimensiones, y cuentan con herramientas que proporcionan conocimiento de los fenómenos y patrones geoespaciales a pequeña o gran escala además, de que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones. Algunos de ellos están enfocados específicamente al análisis de redes de transporte contando con herramientas y algoritmos para resolver problemas como: la ruta más corta, agente viajero, árbol de mínima expansión, asignación, cartero chino, cobertura, modelo de las cuatro fases, entre otros, y una serie de herramientas para el análisis geográfico y espacial, y de edición de las redes.

Dentro de los SIG especializados en transporte se pueden mencionar: “Computer-Aided Design System for Transportation (TransCAD)” (Caliper, 2004), “Strategic Transportation Analysis (STAN)” (INRO, 2006), “Equilibre Multimodal-Multimodal Equilibrium (EMME/2)” (INRO, 2006), “Equilibre Multimodal-Multimodal Equilibrium (EMME/3)” (INRO, 2006), VISUM (PTV, 2006), VISSIM (PTV, 2006) y CUBE (Citilabs, 2006).

Hay que tomar en cuenta que la tendencia en un futuro que enfrentarán los SIG es la de agregar el elemento del tiempo a los datos geoespaciales. Estos SIG temporales incorporarán las tres dimensiones espaciales (X, Y y Z –longitud, latitud y altitud–) añadiendo el tiempo para tener una representación 4D que se asemejará un poco más a la realidad. Es decir tener un SIG que permita ralentizar y acelerar el tiempo de los procesos que en él se modelan y analizar las diferentes secuencias en una red o en una área determinada a lo largo de un período dado (Thurston *et al.*, 2003).

1.5 Necesidades de investigación

Se ha hecho evidente a través de la revisión breve de la literatura que mientras la tarificación al camino y al ambiente es aproximada de manera consistente con el objetivo de disminuir los impactos ambientales y al camino, debidos al tráfico, no hay aun un consenso que aborde los conceptos de tarificación al camino y al medio ambiente.

Se ha logrado estimar el daño ambiental con respecto a las zonas urbanas, pero hay necesidad de realizar investigaciones en carreteras.

La solución del problema de la localización de sensores ha sido resuelta utilizando técnicas clásicas de optimización y heurísticas, pero surge la necesidad de utilizar otras técnicas que permitan encontrar soluciones óptimas globales como lo hacen las Estrategias Evolutivas.

Además, como se mostró en la figura 1.1 surge la necesidad de desarrollar herramientas que cuenten con la versatilidad de los SIG, que permitan conjugar estos tres temas que han sido estudiados por separado.

En esta tesis se propone el desarrollo de un simulador así como, el desarrollo de una metodología basada en un sistema de posicionamiento global (GPS) que estime el impacto ambiental y el daño al pavimento derivado del uso del camino. Los datos GPS se usan para simular tanto la respuesta dinámica del vehículo a las aceleraciones longitudinales y laterales como para estimar el consumo del combustible.

1.6 Justificación

En resumen y tal y como se mencionó en párrafos anteriores, la tendencia de los SIG se dirige hacia la agregación del tiempo como elemento para el análisis de eventos. Por otro lado, se desarrolla una metodología que se alinea en el aspecto del cuidado del medio ambiente como lo establece el protocolo de Kioto. Asimismo, a lo largo de la investigación bibliográfica se ha detectado la necesidad de contar con herramientas para el análisis de redes, desde un punto de vista interdisciplinario. De esta forma se ha ampliado el alcance de la presente tesis, pasando de un enfoque de instrumentación de redes, a uno de análisis y caracterización de redes, dividiéndose la justificación en estos dos grandes temas que de alguna forma se complementan y tienen el objetivo común de proporcionar herramientas que se aplican a las redes de transporte.

Por un lado, en reunión celebrada en enero de 2006, la Dirección General de Planeación (DGP) solicitó al Instituto Mexicano del Transporte (IMT) realizar un estudio y generar una herramienta que le permitiera la recopilación de información de campo que condujera a la estimación, con un alto nivel de confianza, de los flujos de origen a destino (O-D) para los viajes de vehículos (automóviles, autobuses y camiones de carga) que se realizan anualmente por la Red Carretera Federal (RCF). El análisis de la localización de sensores en redes de transporte se justifica dado el interés de la DGP por darle un mayor fundamento técnico a los

elementos más importantes de los procedimientos para estimar los flujos de origen a destino (O-D) que se producen anualmente en la Red Carretera Federal. Así como, por la falta de una metodología que permita ubicar estaciones de encuesta, utilizando un método de asignación que tome en cuenta el congestionamiento en los arcos, que tome en cuenta las características de los caminos y a su vez que sea un sistema dinámico que permita representar perturbaciones en tiempo real, así como las emisiones de contaminantes.

Por otro lado, se ha comprobado que no existe una herramienta que permita evaluar una red desde el punto de vista energético y de impacto ambiental. Como parte fundamental de la aportación de la presente tesis es conjugar información georreferenciada para realizar caracterizaciones de redes tomando en cuenta las características topográficas de la red, e incluso de señalamientos y muebles urbanos.

Además de todo esto, se pretende como producto de esta tesis proporcionar la sistematización de estas herramientas, a través de un programa de visualización de los parámetros y variables asociadas al modelo resultante, lo cual complementa el impacto de contar con las herramientas desarrolladas.

1.7 Descripción del problema

Como ya se ha mencionado, se tienen dos vertientes en el desarrollo de esta tesis, la primera con respecto a desarrollar una metodología que permita evaluar el daño al pavimento y la cantidad de emisiones al medio ambiente, la cual sirva de base para el establecimiento de tarifas; por otro lado el cambio en el tiempo de la distribución de los viajes sobre la red de transporte hace que la captación de la información sobre la red varíe. La ubicación de los sensores permitirá captar un determinado número de datos, pero a su vez una incorrecta ubicación de ellos dará pie a que se pueda repetir dicha colecta de información. Lo anterior indica que la distribución de los viajes a través de la red depende de la técnica de asignación, pero a su vez, esta distribución depende directamente de las características de los arcos y la conectividad de la red, que hasta ahora no han

tomado en cuenta el estilo de manejo del usuario y las externalidades derivadas de ello.

El problema de la localización de los sensores se define como: dada la topología de una red y la distribución de los viajes (pares Origen-Destino) sobre esta red (mediante un modelo de asignación de tráfico) se debe captar la mayor cantidad de información asignada en una red de transporte mediante el menor número posible de sensores.

Por otra parte, como parte de la caracterización de las redes viales, se requiere contar con herramientas para su evaluación en lo que respecta a su amigabilidad para con el ambiente. Esto es, cada diseño geométrico de las vialidades representa distintos impactos ambientales que se asocian directamente con las maniobras que los usuarios deben hacer para circular por ellas. Además, también es necesario tomar en cuenta el daño propio que sufrirá la infraestructura durante el paso de los usuarios. Esto es, el número de frenadas y arranques, así como el trazo vertical y horizontal afectará el deterioro mismo de la infraestructura, y su impacto ambiental.

1.8 Hipótesis

Dado que se tienen dos temas relacionados entre sí, pero con enfoques diferentes, se plantean las siguientes hipótesis.

La primera está enfocada a la distribución de los viajes sobre la red que dependen en gran medida del tiempo de viaje en los arcos al utilizar las rutas más cortas y atractivas para los usuarios entre su origen y su destino, ya que el tiempo de viaje durante el recorrido es menor provocando un nivel de congestionamiento en los arcos que captan más pares origen destino. Por otro lado el estilo de manejo en cada arco y dadas las condiciones del tiempo de viaje experimentado por cada usuario dentro de cada arco se reflejará en el daño al pavimento causado por las variaciones en la aceleración. Podemos decir entonces que existe una relación entre la distribución de los viajes, el congestionamiento en cada arco y el daño al pavimento. Por lo tanto la primera hipótesis se enuncia como sigue:

Existe una relación entre la distribución de los viajes y el daño al pavimento.

Hablando específicamente del tema del daño al pavimento se puede observar que el estilo de manejo influye en la energía que se acumula sobre el pavimento. Además de que la representación de los datos GPS permite tener un nivel de detalle más desagregado con respecto a las condiciones de manejo y del camino. El nivel de detalle empleado en el GPS permite generar una mayor exactitud en los cálculos de emisión de contaminantes y daño al pavimento con respecto de otras metodologías, por ejemplo la utilizada por el Banco Mundial (Archondo-Callao y Fiz, 1994) por el efecto del campo tiempo. Además, se ha observado en la literatura que existen limitaciones en cuanto a los enfoques, ya que no existe un modelo que combine ambos aspectos tanto el ambiental como el del daño al pavimento, además de tomar en cuenta específicamente el estilo de manejo del conductor. De acuerdo a lo anterior, la segunda hipótesis se formula como sigue:

Existe una relación entre el consumo de combustible y el daño al pavimento.

1.9 Objetivo general

Se plantean dos objetivos el primero enfocado al desarrollo de una herramienta para la resolución de la localización de sensores:

Generar una metodología matemática que permita captar la mayor cantidad de información (con la menor cantidad de sensores), a través de un modelo de asignación en redes que tome en cuenta tanto el efecto del congestionamiento.

El segundo objetivo se enfoca al desarrollo de una herramienta que permita medir el daño al pavimento y las emisiones contaminantes:

Generar una metodología matemática y un simulador que permitan estimar el daño al pavimento y las emisiones contaminantes producidas por un tipo de vehículo a través de datos GPS.

1.10 Objetivos específicos

- Generar una herramienta computacional SIG que permita instrumentar y caracterizar redes urbanas y suburbanas de transporte en cuanto al impacto ambiental, el daño al pavimento generado por el paso de vehículos pesados así como, por las condiciones de manejo del usuario para establecer criterios en cuanto al establecimiento de tarifas.
- Generar una herramienta computacional SIG que permita instrumentar y caracterizar redes urbanas y suburbanas de transporte en cuanto y de las características topográficas y de señalamiento para la localización de sensores de colección de información.
- Aplicar la metodología propuesta en una red real a través de la obtención de información GPS para validar el modelo propuesto.
- Utilizar otras técnicas de solución de modelos de optimización enfocado a la localización de sensores que permitan comparar el modelo propuesto para su validación.

1.11 Metodología

La metodología para el desarrollo de este trabajo de tesis consta de los siguientes puntos:

- Recopilación de información, modelos matemáticos y heurísticas relacionadas con las técnicas utilizadas para resolver el problema de la localización de sensores (NSLP por Network Sensor Location Problem).
- Desarrollar una clasificación y análisis de las distintas técnicas utilizadas para resolver el NSLP.

- Contar con un conocimiento del estado del arte en los temas de instrumentación y caracterización de redes.
- Recopilación de información y métodos matemáticos relacionados con la interacción de los vehículos con el pavimento y de las emisiones contaminantes de los vehículos.
- Analizar y comprender a detalle las metodologías existentes para estimar la asignación de flujos en redes, por los métodos: “Todo o nada”, “Equilibrio del Usuario” y métodos Estocásticos.
- Desarrollar una macro, que permita encontrar la ubicación de estaciones a través de una asignación del tipo “Todo o nada” y un método que tome en cuenta el congestionamiento.
- Analizar el modelo de optimización utilizando estrategias evolutivas.
- Realizar un análisis de la topología de la red.
- Formular un modelo matemático que permita ubicar de forma óptima sensores en una red de transporte tomando en cuenta las observaciones obtenidas de las aplicaciones de los modelos utilizados de daño a pavimentos y emisión de contaminantes.
- Establecer las bases para construir un simulador utilizando el modelo ya formulado, y realizar aplicaciones preliminares en redes hipotéticas y pequeñas y a la calibración del mismo.
- Desarrollar una herramienta informática que permita visualizar la evolución de las variables involucradas en la interacción del vehículo con la infraestructura y el ambiente.

1.12 Resultados esperados

Se generará una metodología y un modelo matemático para la ubicación óptima de sensores de colección de información, así como la construcción de un simulador que permita medir las emisiones contaminantes y el daño al pavimento causado por el paso de un vehículo pesado sobre una red de transporte, utilizando datos GPS de entrada para el modelo.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) realiza de forma anual, de carácter muestral y estadístico, el estudio llamado de pesos y dimensiones del autotransporte. La metodología generada le ayudará a tomar decisiones en cuanto a la mejor conveniencia de las estaciones de pesaje dinámicas, o estaciones de encuesta para la generación de matrices OD en la Red Carretera Federal. Esta ubicación óptima le permitirá reducir el número de estaciones o sensores y por consiguiente reducir sus costos.

La aplicación a futuro que tendrá la generación de esta nueva metodología, se pretende que sea utilizada por las instituciones anteriores y por las universidades que estudian temas de transporte, especialmente con redes; por ejemplo la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ).

Finalmente, establecer la programación y generación de las bases para el desarrollo de un simulador que permita realizar análisis de distintas configuraciones de redes en distintas ciudades de tamaño medio con distintos tipos de vehículos, distintos estilos de manejo y distintas características del camino. Una vez terminado este producto, se presentará el proyecto a la Dirección de Transporte del Gobierno del Estado de Querétaro para crear un vínculo de estudio y la mejora del mismo.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

Ya que se tienen tres temas a analizar dentro de este trabajo, se llevó a cabo una revisión bibliográfica, de manera cronológica, de los distintos modelos que se han propuesto para resolver tanto el NSLP así como, la relevancia de los modelos propuestos para el consumo de combustible y del daño al pavimento. Se discuten las fortalezas y debilidades de los mismos lo que servirá como base para la formulación del modelo y la metodología propuestos en este trabajo de tesis.

2.1 Cronología de herramientas para ubicar sensores

A lo largo del estudio de este problema de localización de sensores se han presentado diversas soluciones empleando desde modelos estocásticos hasta simulación, desde el análisis topológico de la red hasta la programación lineal entera. En la figura 2.1 se muestra la clasificación de las metodologías propuestas para resolver el NSLP.

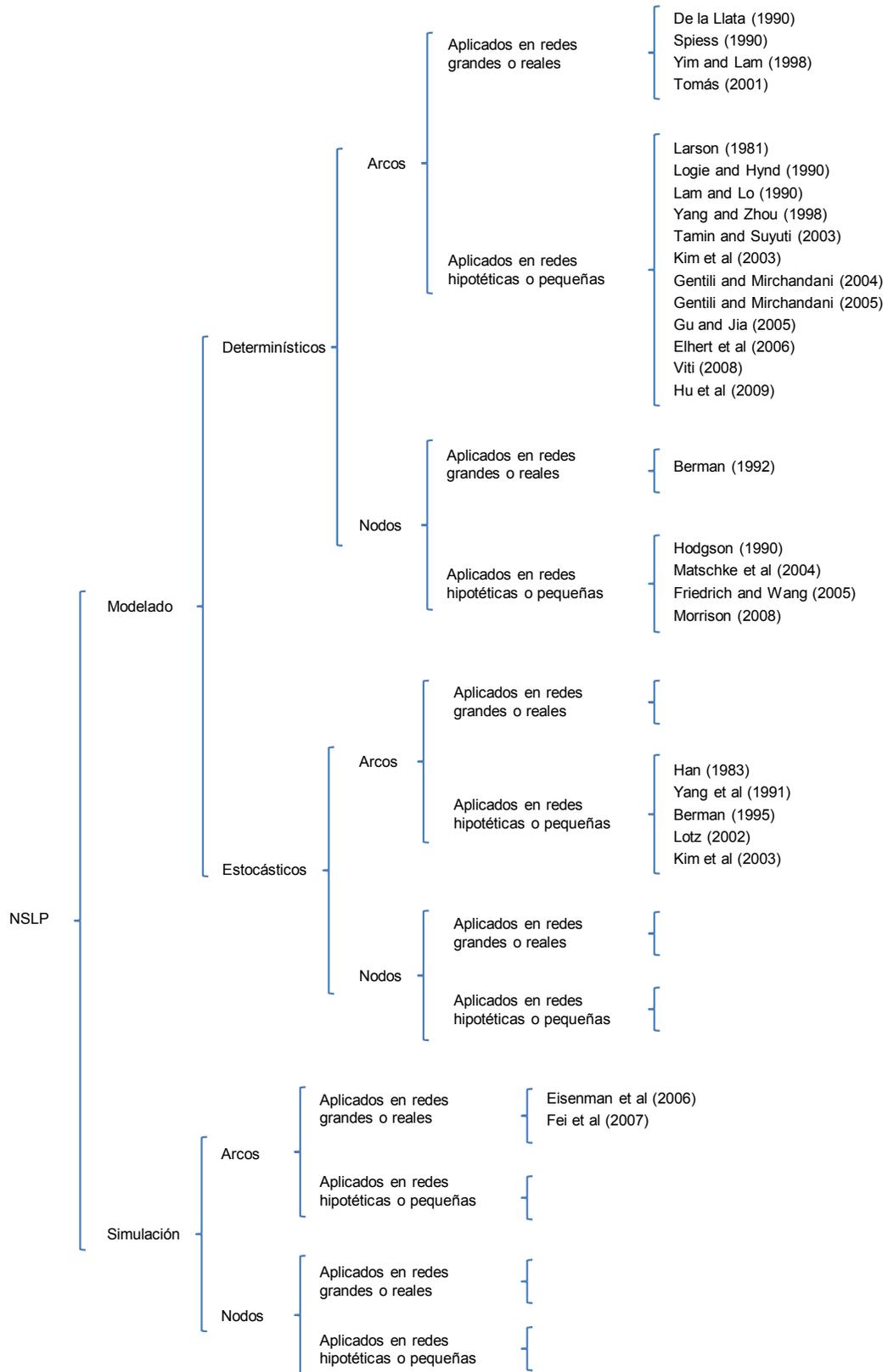


Figura 2.1. Clasificación de metodologías para resolver el NSLP

Como se observa en la figura 2.1, la mayoría de los modelos encontrados utilizan procedimientos determinísticos y la mayoría de ellos ubican los sensores sobre los arcos en vez de nodos y la mayoría fueron aplicados en redes hipotéticas o pequeñas mientras que sólo dos autores utilizaron simulación como una herramienta para ubicar los sensores. En los párrafos siguientes se describen las metodologías por el tipo de técnica empleada, la ubicación de los sensores, la aplicación de la metodología y finalmente de forma cronológica.

2.1.1 Modelos determinísticos

Los autores citados en estos párrafos ubican los sensores sobre los arcos y muestran aplicaciones de sus metodologías en redes grandes o reales tales como (De la Llata, 1990). Su formulación trata de captar las variables que maximizan la información del flujo sobre los arcos y posteriormente realiza otra formulación matemática que encuentra las variables que minimizan el número de sensores de acuerdo al número de información a obtener. Dos heurísticas fueron desarrolladas, la primera es una heurística voraz y la segunda denominada heurística de Ignizio, la cual tiene un mejor desempeño en la solución del problema pero requiere un mayor tiempo de cómputo que la voraz porque evalúa la información captada, y el total de información, que se puede obtener si un arco que ya está seleccionado es removido. Esta metodología fue aplicada en una red de tamaño medio con 114 centroides (SCT, 1988).

En este mismo año otro concepto del problema fue usado y aplicado en Canadá (Spiess, 1990). Este autor nombró el problema de la ubicación de sensores como: "Count post links". Spiess usó una técnica de asignación de equilibrio del usuario donde un conjunto de arcos con funciones de costo en arcos no decrecientes aseguró la convergencia del modelo. Esta metodología fue aplicada en una red grande del orden de 1200 arcos y más de 500 centroides en redes como Suiza, Suecia y Finlandia.

En 1998, Yim y Lam basaron su metodología en la metodología de Logie y Hynd (1990) tomando en cuenta la proporción de elección de arco y el volumen disponible de tráfico en los arcos por lo que escribieron las siguientes reglas con el propósito de eliminar información redundante:

- Regla 1 del máximo par OD captado neto: Dentro de una red de caminos particular y para el mismo número de puntos conteo, el mejor conjunto de ubicaciones de conteo es aquel que captura la mayor cantidad de viajes netos OD
- Regla 2 del máximo par OD captado total: Cuando más de un conjunto de puntos de conteo cumple con los requerimientos de la regla 1, el mejor conjunto es el grupo con el mayor número de viajes OD totales capturados en ubicaciones individuales.

El procedimiento dice que el arco con el flujo OD neto más alto será elegido como un sensor (en cada iteración) hasta que no haya arcos disponibles a revisar. Si dos o más arcos captan la misma cantidad de flujo OD neto, el único a ser seleccionado debe ser aquél con el flujo OD total más alto siempre que tenga más información independiente. Estos autores desarrollaron una heurística.

De acuerdo con ellos, los proyectos en la vida real son mucho más grandes que los teóricos y la formulación de objetivos y determinación de las mejores ubicaciones de sensores es impráctica. Por ejemplo en todo el territorio de Hong Kong hay aproximadamente 274 zonas y más de 3000 arcos por lo tanto la aproximación con programación lineal generará más de 225.000.000 variables y esfuerzos enormes de cómputo serán requeridos para hallar la solución. Para dar una solución ellos proponen una heurística denominada Método de Máxima Solución OD como una aproximación alternativa que identifica el mejor grupo de sensores mediante la selección de arcos adicionales uno por uno basados en dos reglas básicas.

Tomás (2001) desarrolló una aplicación de programación con restricciones para hallar la ubicación de sensores y el mínimo número de ellos en zonas urbanas para obtener el costo el mínimo costo de datos origen-destino. Este modelo resuelve el problema de encontrar la matriz de viajes OD en una zona

dada a un costo óptimo. El objetivo fue elegir los movimientos de vueltas a ser medidos como complemento a algunos volúmenes totales en las salidas, entradas y secciones de cruzamiento en la zona. Después de eso, Tomás aplicó el modelo en una red real de transporte.

Siguiendo el criterio elegido, los siguientes artículos describen una preferencia en la ubicación de sensores sobre los arcos, uno de estos modelos que siguen este criterio es desarrollado en 1981 por Larson quien desarrolló un modelo capaz de identificar la ubicación de los sensores en la cual el flujo máximo de tráfico de usuarios ocurre.

Logie y Hind (1990) desarrollaron una metodología de cobertura de pares OD para localizar sensores mientras que Lam y Lo (1990) propusieron algunas heurísticas para definir donde deberían ser ubicados los sensores sobre los arcos de una red para obtener una mejor estimación e una matriz OD.

Después Yang y Zhou (1998) propusieron 4 reglas, desarrollaron una heurística y un modelo de programación lineal para encontrar la ubicación de los sensores. Estas reglas son:

- Regla de cobertura OD: los puntos de conteo de tráfico en una red de caminos deberían ser localizados de tal forma que una proporción de viajes entre cualquier par OD será observado.
- Regla de la máxima fracción de flujo: para un par OD, los puntos de conteo de tráfico deberían ser localizados en los arcos de tal forma que la fracción de flujo entre este par OD con los flujos en esos arcos es lo más grande posible.
- Regla de la máxima intercepción de flujo: dentro de un conjunto de arcos, aquellos a ser monitoreados deberían interceptar tanto flujo como sea posible.
- Regla de independencia de arco: los puntos de conteo de tráfico deberían ser localizados en la red de tal forma que los conteos de tráfico resultante en todos los arcos elegidos no son linealmente dependientes.

Basados en estas reglas, aquellos arcos a ser elegidos como puntos de conteo serán aquellos que son independientes de los otros, los que puedan interceptar el flujo máximo y que puedan medir una proporción mayor de viajes para cualquier par OD. Utilizando estas reglas, formularon los siguientes métodos:

- Un modelo de programación lineal para maximizar los flujos de tráfico en la red interceptados mientras mantienen todos los pares OD cubiertos, y
- Una aplicación del modelo de Berman (1995) para formular el problema entero como un proceso de decisión de Markov de recompensa promedio con el objetivo de maximizar los flujos captados en la red.

Tamín y Suyuti (2003) establecieron tres factores para obtener el número y la ubicación de los sensores:

- La tasa de proporción de los viajes (pares OD) que pasan en cada arco.
- Las condiciones de independencia e inconsistencia de los flujos de tráfico.
- Las condiciones físicas de los arcos.

Para priorizar los arcos, se marcan aquellos que son usados por muchos pares OD y al mismo tiempo sirven a una larga proporción de flujos OD. Además el factor de fricción de los arcos y el grado de saturación son tomados en cuenta.

Finalmente la matriz estimada es comparada con la actual para medir el nivel de precisión y en combinación con el número de conteos de tráfico seleccionados son analizados para encontrar el mejor número y ubicación de sensores.

Kim *et al.* (2003) desarrollaron un modelo llamado “modelo de arco-base” el cual es una combinación de tres algoritmos:

- De suma ambiciosa (GA)
- De suma ambiciosa y sustitución (GAS) y
- De ramificaciones y límites (BB)

El modelo de arco-base encuentra el conjunto de arcos que contendrán la máxima cobertura de pares OD con el mínimo costo de conteo de tráfico. Las reglas principales fueron adoptadas a estos arcos que sirven a un gran número de pares OD.

Gentili y Mirchandani (2004) aplicaron un análisis para encontrar el número de sensores de imagen en intersecciones para recolectar la información necesaria sobre los arcos y la tasa de vueltas para agregar nuevas restricciones para estimar, con una única solución, los pares OD.

Gentili y Mirchandani (2005) crearon un Nuevo conjunto del problema de ubicación en redes el cual determina donde se deben ubicar los sensores para obtener la información máxima del volumen de flujo en caminos específicos. Se distinguieron tres distintos escenarios: el escenario de conteo de información cero, el escenario de información de conteo total y el de conteo de información parcial. Utilizan el rango de una matriz de incidencia de arcos caminos para verificar si un sistema de ecuaciones lineales es determinable y para determinar el número y las ubicaciones de los sensores activos en los arcos específicos para proveer información adicional de flujo en los caminos para inferir los flujos estimados completos en todos los caminos. Hogberg señaló que los arcos con altos flujos esperados y los arcos con que pasan a través de los pares OD y que tienen que ser contados en otros arcos son más valiosos que otros (Friedrich y Wang, 2005).

Gu y Jia (2005) desarrollan una aproximación matemática al problema de la ubicación de los sensores. Este artículo define el concepto del conjunto de control de aristas es decir, un conjunto de aristas S en una gráfica tal que si dos funciones de flujo en red f_1 y f_2 son dadas, y $f_1(S) = f_2(S)$, entonces las funciones son iguales en cualquier otra parte. Es decir, si el flujo en cada arista en S es conocido, el flujo en cualquier parte de la gráfica se puede determinar simplemente encontrando una función de flujo en la gráfica que relaciones los valores determinados en S . El algoritmo que busca la solución al conjunto S dadas dos condiciones en la gráfica:

- Todos los arcos de la gráfica tienden hacia un ciclo dirigido.
- No hay fuentes o fugas en la gráfica.

- A pesar de ello, estas condiciones están parcialmente limitadas ya que no modelan condiciones físicas con exactitud.

Ehlert *et al.* (2006) basaron su metodología en el trabajo desarrollado por Yang y Zhou y desarrollaron una herramienta computacional basada en técnicas de programación entera mixta el cual resuelve el problema complejo formulado solo de manera matemática por Yang y Zhou (1998). Este software incluye la extensión presupuestaria de Chung y un conjunto de peso para jerarquizar los pares OD por su importancia. Además esta herramienta puede resolver dos nuevos elementos del NSLP:

- Segunda mejor solución: si detectores anteriores están todavía presentes en el sistema, este calcula el lugar donde otros detectores deberían ser instalados;
- Reglas de peso: algunos pares OD deben ser de mayor importancia e interés desde el punto de vista de un administrador y son empíricamente favorecidos. En general, incluso si no hay una opinión valiosa, algunos arcos contienen más información que otros. Un peso relativo es asignado también al flujo OD, el cual toma en cuenta que la fiabilidad de la información es sensible a las tasas de flujo divididas dentro de las diferentes rutas OD. La forma de la función de peso es elegida de información teórica.

Viti *et al.* (2008) desarrollaron un modelo basado en el modelo de Yang y Zhou (1998). En el modelo de Yang no se necesita conocer la información de los tiempos de viaje en la red ni tampoco utiliza la capacidad de la red como un parámetro de entrada del modelo, pero se utiliza el concepto estadístico del Error Relativo Máximo Posible (Maximum Possible Relative Error –MPRE– por sus siglas en inglés).

Estos autores utilizaron los tiempos de viaje en los arcos en la función objetivo por lo tanto tomaron en cuenta las capacidades. Se considera que para adoptar un modelo dinámico de redes para procesar los tiempos de viaje en todos los arcos se toma en cuenta la variación temporal de los flujos de forma correcta, la función objetivo debe tomar en consideración explícitamente para la relación entre flujos y tiempos de viaje a lo largo de los arcos.

En este modelo se reformula el MPRE, originalmente propuesto para comparar los flujos OD midiendo la desviación estándar entre los tiempos de viaje estimados en los arcos y los reales mediante esto se puede obtener información más detallada que en el clásico NSLP tomando los tiempos de viaje de los datos del GPS y asumiendo que el tiempo de viaje en la ruta se encuentra en equilibrio. El algoritmo modificado sigue los siguientes pasos:

- Resolver el algoritmo de cobertura OD y encontrar el número mínimo de sensores necesarios para cubrir todos los pares OD.
- Encontrar el sensor entre la solución de cobertura OD que tenga la correlación más alta con los otros arcos y eliminar las correlaciones de flujo de los arcos monitoreados de la matriz de correlación.
- Reprocesar el algoritmo de cobertura OD y encontrar el nuevo arco más representativo a ser monitoreado.
- Detener cuando en valor máximo de sensores se alcance o cuando el porcentaje mínimo de flujos sea captado.

Hu *et al.* (2009) cambiaron el paradigma usando el concepto de arcos base para resolver el NSLP. Para lograr esto se crea primero una matriz de incidencia formada por todos los caminos de la red ubicados como filas y los arcos de la red ubicados como columnas. Esta matriz se rellena con el valor 1 cuando el arco forme parte de un camino y 0 cuando no. Dentro de esta metodología la matriz de incidencia se considera también un espacio vectorial y por lo tanto tiene un rango. Para resolver el problema se introduce el concepto de la forma escalonada reducida de la matriz de incidencia para identificar los arcos base de dicha matriz con los cuales se puede formar cualquier camino sobre la red.

Se establece también que cualquier vector columna puede ser representado como una combinación lineal de un conjunto de r vectores columna unitarios cuyos coeficientes de combinación lineal α son los elementos de la columna correspondientes las filas de no ceros. La información de estos arcos base se usa para describir completamente la estructura de la red y sobre estos arcos base se encuentran los sensores.

Dentro de los modelos que localizan los sensores en los nodos y que son aplicados en redes reales se tienen el desarrollado por Berman *et al.* (1992). Estos autores regresan a la idea de usar el máximo número de flujos del usuario. Este modelo se basa en el modelo propuesto por Hakimi y Hogson. Este nuevo modelo asume que una persona viaja (en un ciclo de una sola parada) desde su casa hasta la instalación de servicio, consume el servicio y regresa a su casa. Este modelo fue utilizado para determinar la localización óptima de instalaciones de servicio discrecional, tales como cajeros automáticos y estaciones de gasolina, para interceptar el máximo flujo posible de clientes potenciales. Además muestran como determinar el mínimo número de instalaciones requeridas para interceptar una fracción especificada del flujo total de clientes. El modelo de Berman asume lo siguiente:

- El flujo de los usuarios a lo largo de todos los caminos de la red de transporte es conocido.
- Sólo el flujo que pasa a través de una instalación se considera como interceptado.
- Las instalaciones de servicio tienen suficiente capacidad por lo tanto no hay líneas de espera frente a las instalaciones existentes.

En otras palabras el cliente no solo hace una parada al contrario el cliente tiene un viaje preplaneado y pasa por más de una instalación de servicio en su ruta. En este modelo se asume que los planeadores conocen los viajes entre los pares OD y pueden obtener las tasas de flujo para ubicar un determinado número de instalaciones de servicio en la red que maximiza el flujo de clientes potenciales que pasan al menos por una instalación de servicio.

El problema se formula como un problema de programación lineal entera y fue resuelto usando una heurística voraz para ubicar de forma secuencial las instalaciones de servicio en los nodos que interceptan la mayoría de los flujos no interceptados. La heurística fue programada en PASCAL y examinada en redes con nodos y caminos que van desde 10 hasta 100 y probaron que la heurística produce el 65% de la solución óptima.

Aquellos modelos que ubican la solución en los nodos y que fueron probados en redes hipotéticas son descritos en los siguientes párrafos.

Hay un registro de otros modelos que fueron reportados en la literatura desde 1990. El primero de ellos es desarrollado por Hodgson (1990) quien usó el modelo de ubicación de cobertura de flujo (FCLM – *Flow Covering Location Model*) considerado como un caso especial del problema de ubicación de la máxima cobertura y se define como un problema de programación lineal entera donde un conjunto de nodos es capaz de captar el flujo máximo para maximizar la información. Para resolver este problema, utilizó dos heurísticas:

- Heurística voraz de cobertura múltiple: escoge p nodos con los flujos más altos que pasan a través de ellos. Los flujos que pasan a través de un nodo y fueron seleccionados en un paso, pueden ser seleccionados de nuevo en un paso subsecuente.
- Heurística Voraz de cobertura no-múltiple: escoge p nodos con los flujos más altos que pasan a través de ellos pero cuando un nodo es seleccionado todos los flujos que pasan a través del nodo, son removidos.

Incluso cuando esta metodología obtiene la mejor solución para los pares OD y flujos, encuentra los caminos más cortos entre cada par origen-destino lo que es equivalente a usar una técnica de asignación Todo o nada.

Matschke *et al.* (2004) propusieron el uso de tasas de vuelta en intersecciones. Usando estas tasas detectaron variaciones en el flujo de tráfico local e infirieron los flujos de los alrededores. El inconveniente fue que se necesitan sensores extra y costo extra. Matschke y Friedrich han concluido que se

podría hacer una mejor estimación de una matriz OD con información de los flujos en los arcos y flujos de vuelta (Matschke y Friedrich, 2001).

Friedrich y Wang (2005) aplicaron cuatro índices para priorizar el conteo en intersecciones de acuerdo con su contribución hacia la matriz OD y concluyen que de acuerdo con los resultados los flujos de vuelta en las intersecciones contribuyen con más información que los flujos de entrada en los arcos en las intersecciones.

Castillo *et al.* (2007, 2008a, b, c) proponen un método de espacio nulo para resolver el problema de observabilidad en una red (un problema análogo al NSLP) de una manera eficiente pero como parte de un problema de estimación de demanda OD. Castillo *et al.* resuelven el problema de observabilidad como un sub problema de un problema más amplio para determinar OD y flujo en arcos, su enfoque requiere un subconjunto de pares OD observados y flujos en arcos medidos (e.g. Castillo *et al.*, 2008a, b, c), o flujos en ruta dados por técnicas como el reconocimiento de placas (e.g. Castillo *et al.*, 2008d). Esto es, que en la metodología se requiere conocimiento previo de los pares OD o flujos en la ruta, o probabilidades de elección de ruta dadas por algunas reglas de asignación de tráfico, para formular la ecuación de conservación de flujo, restringiendo el alcance de la aplicabilidad del enfoque en situaciones del mundo real.

Morrison (2008) ubica los sensores en las intersecciones (vértices) y sus usos en gráficas no direccionadas. Dentro de este trabajo se establece la conservación de flujo en cada vértice y aquellos vértices con flujos balanceados distintos de cero.

2.1.2 Modelos estocásticos

Los autores descritos en los párrafos siguientes utilizan modelos estocásticos para resolver el NSLP, ubican los sensores sobre los arcos y muestran aplicaciones solo en redes pequeñas como lo hizo Han en 1983 quien usó una estrategia para obtener información a través de los conteos de tráfico en una red donde se incluyeron dos factores: ubicación (donde los sensores son

localizados) y la cobertura (el porcentaje de conteo de arcos). En lo que respecta a la ubicación, tres estrategias fueron consideradas: el método de selección aleatoria, la mayoría de las ubicaciones y los patrones geográficos. Un modelo denominado LINKOD fue desarrollado que trabaja con redes en zonas pequeñas y congestionadas.

Yang *et al.* (1991) propusieron la renombrada regla de cobertura OD para la localización de los sensores en los arcos para delimitar el error de estimación OD. Después de este modelo Berman *et al.* (1995) desarrollaron un modelo siguiendo las mismas reglas establecidas anteriormente (Berman *et al.*, 1992) pero esta vez asignaron flujos de manera probabilística para conocer las decisiones de viaje de los usuarios las cuales no son reflejadas en un modelo determinístico como lo es el Todo o nada (Berman *et al.*, 1995).

El problema fue formulado como un Proceso de Decisión de Markov (MDP) de recompensa promedio y la función objetivo a encontrar sirve para hallar un conjunto de ubicaciones para las m instalaciones que maximizan el flujo total interceptado evitando el doble conteo. Para resolver el problema, se establecieron dos formulaciones para variables de tipo entero. Para simplificarlo formularon un modelo no lineal equivalente y demostraron su equivalencia respecto de la primera formulación.

Por último, crearon una heurística voraz para localizar las instalaciones de forma secuencial en los nodos que interceptan la mayor parte del flujo no interceptado que aún permanece en la red.

En 2002, Lotz propuso una regla tomando en cuenta la precisión de los pares OD estimados (obteniendo la desviación estándar promedio entre los flujos estimados y los medidos en cada par OD). De acuerdo a esto, el arco que contribuye con menos desviación será elegido como un sensor.

Kim *et al.* (2003) usaron el modelo llamado "modelo de arco base" descrito anteriormente y usado incluso en un procedimiento estocástico para resolver el NSLP.

2.1.3 Simulación

Solo dos autores presentan una solución para resolver el NSLP usando simulación y por supuesto toman en cuenta las variaciones del tiempo, estos autores son:

Eisenman *et al.* (2006) observaron el NSLP desde una perspectiva diferente del valor de la información. Aquí se menciona que los sensores continuamente proporcionan información que ayuda a caracterizar el estado de una red y usar esta información en conjunto con el conocimiento puede enriquecer la estimación del modelo y el desempeño de la predicción. Utilizaron el software Dynasmart-X para simular la información en tiempo real utilizando la información histórica. El modelo es un modelo de aprendizaje continuo que recibe información en tiempo real y usa un proceso iterativo para incorporar la información e incrementar la calidad de la estimación y de la predicción.

Además el NSLP se ve como un proceso de aprendizaje del tráfico que necesita más sensores para agregar información valiosa que puede ser usada para actualizar las estimaciones del estado de tráfico de la red. Esta metodología fue aplicada en la red de Meryland Chart con 2,182 nodos, 3,387 arcos y 111 zonas.

Fei *et al.* (2007) propusieron una nueva solución para el problema de cobertura OD con variaciones temporales de los flujos obtenidos por simulación con el software Dynasmart. En este artículo se utilizaron técnicas de filtrado de Kalman para correlacionar el contenido de la información de la posición de cada sensor y de esa manera minimizar el error en la estimación de la matriz OD. De acuerdo con los autores características dinámicas y estocásticas son incluidas por medio de la simulación.

2.2 Deterioro de la infraestructura causada por vehículos

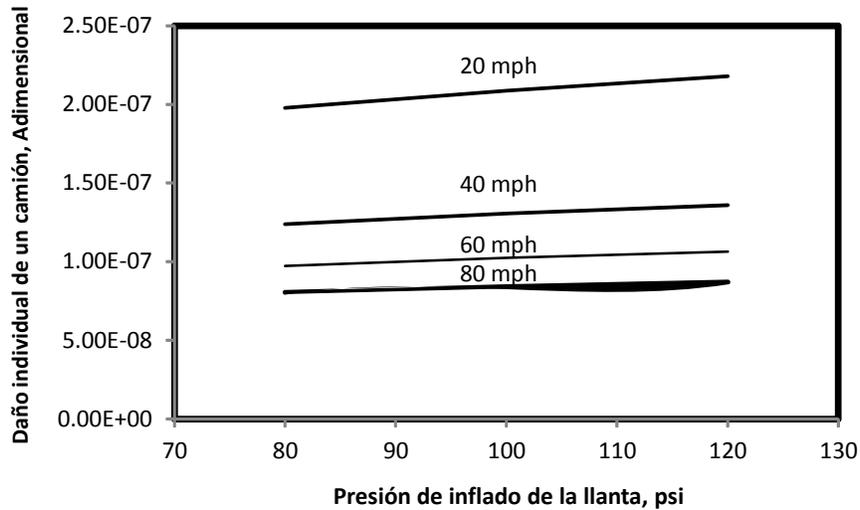
Sistemas razonables de tarificación en el camino han sido reportados como críticos para la viabilidad de redes de caminos (Martin *et al.*, 2010), como ingresos a través de impuestos en el combustible que han aumentado a pesar de las mejoras en las eficiencias de los motores (Porter y Kim, 2008) y los beneficios de la tarificación en el camino han sido reconocidos en diferentes ámbitos por ejemplo, el efecto positivo de la tarificación en el camino por los niveles de congestamiento descritos por Small (2004), con beneficios en la red del orden del 39% de los costos iniciales de operación. Arnold *et al.* (2010) pronosticaron a largo plazo reducciones en la distancia recorrida (10 a 15 kilómetros) y emisiones de CO del orden del 10%. No obstante, ha habido dificultades para implementar esquemas de cargo de tarificación en el camino los cuales han sido reconocidos desde el punto de vista económico y ambiental (Fosgerau y Van Dender, 2010). Ese podría ser el caso de Los Estados Unidos de Norteamérica, comparado con la aceptación global de la tarificación sobre los caminos en los países Europeos (Arnold *et al.*, 2010; Bhatt *et al.*, 2009). En ese sentido, de acuerdo con DeCorla-Souza y MacGregor (2009), para sobreponerse a la oposición de la tarificación en el camino requiere “exploración y desarrollo de soluciones creativas que son aceptables por el público y que contrastan con la política, seguridad y desafíos operacionales”, el cual es extremadamente desafiante como sugieren las encuestas que la gente más bien pagaría impuestos al combustible que impuestos al kilometraje recorrido (Zmud y Arce, 2008).

No obstante, políticas exitosas y fallidas ilustran la necesidad de un criterio equitativo basado en el ámbito geográfico y económico (Taylor *et al.*, 2010) y la importancia de implementar políticas de tarificación del camino, particularmente en países en desarrollo, se reportan como críticas (Mahendra, 2008) como el incremento en la motorización de la población en esas ciudades que demandan gran presión en el ámbito económico y ambiental.

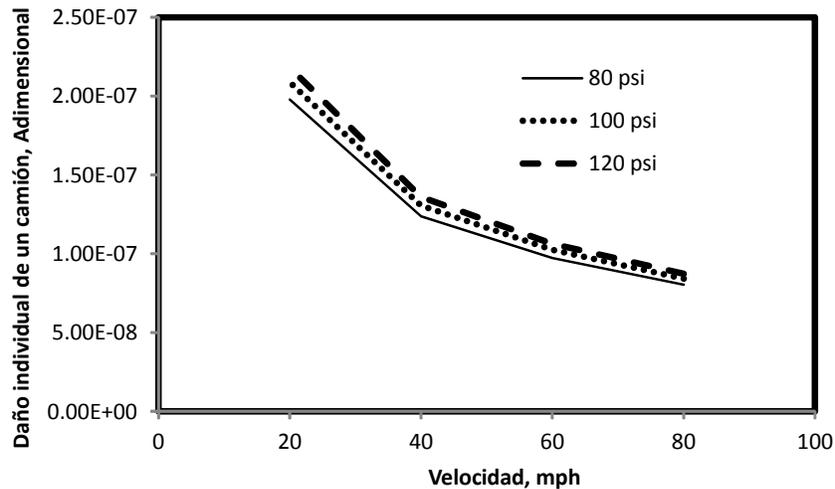
2.2.1 Tarificación en el camino y en el ambiente

En un acercamiento limitado, RP se interpreta como la necesidad de cargar a los usuarios de los caminos en términos del tiempo o distancia viajada, apuntando a la cobertura para el desarrollo y mantenimiento de la infraestructura (Schmedding *et al.*, 2006). A este respecto, se ha reportado una aproximación de costo marginal mixto que toma en cuenta los costos de operación de los usuarios del camino y el impacto de vehículos pesados sobre el pavimento, mientras se deja fuera el congestionamiento, la seguridad y explícitamente el costo de las emisiones fuera del análisis (Martin *et al.*, 2010).

Parker y Hussain (2006) proponen una metodología de peaje para los usuarios de los caminos en términos de una serie de características del vehículo, incluyendo el nivel de carga su distribución entre los ejes, así como la presión de inflado de las llantas y de la velocidad de viaje. Se indica que la reducción de la velocidad del vehículo cuando viaja en un pavimento flexible, desde 40 hasta 20 millas por hora, significa incrementos en el daño al pavimento del orden de un 63%. Por otro lado, el decremento en la presión de inflado desde 90 a 30 psi reduce el esfuerzo longitudinal al fondo de la capa de pavimento flexible cerca del 20 al 40%. La figura 2.2 ilustra el efecto reportado por la velocidad de un camión y la presión de inflado de la llanta sobre un pavimento flexible. El aumento en la presión de inflado implica de esta manera un incremento ligero en el daño al pavimento, mientras un aumento en la velocidad de viaje disminuye el efecto de los camiones sobre tipos de pavimento semejantes. Estos resultados ilustran claramente el conflicto que puede existir cuando se trata de valorar los efectos del daño al pavimento y al ambiente de los camiones. Eso es, ha sido ampliamente aceptado que una reducción en la presión de inflado induce un incremento en el consumo de combustible (Grugett *et al.*, 1981).



(a) Efecto de la presión de inflado.



(b) Efecto de la velocidad en el daño al pavimento.

Figura 2.2. Resultados de la simulación del daño al pavimento flexible como una función de la presión de inflado y velocidad del camión (Parker y Hussain, 2006).

Chu y Tsai (2004) debaten los costos internos y externos del transporte en los caminos, y la necesidad de incorporar modelos convincentes para el deterioro del pavimento causado por camiones pesados. Ellos describen diferentes costos sociales, incluyendo el costo de congestionamiento, el costo ambiental y el costo por accidentes. Holguín-Veras *et al.* (2006) realizaron un análisis estadístico de las políticas de peaje libre en los Estados Unidos en cuotas de peaje y encontraron

resultados contradictorios como los administradores del camino quienes aparentemente buscan ingresos, mientras que los autores insisten en la necesidad de cargar a los usuarios del camino en términos del daño que causan a la infraestructura.

Koskinen (2010) describe una metodología basada en simulación por computadora de impuestos en el combustible para estimar las emisiones en flujos de tráfico congestionados, expresándolos en términos monetarios. Se reporta que el esquema propuesto representa una respuesta al congestionamiento socio-económico así como los costos de la infraestructura, señalando encareciendo la colección del peaje electrónico de esta manera, los costos de las emisiones calculadas son cargados específicamente a cada vehículo sencillo en el tráfico, como una función de sus características, niveles de congestionamiento y tipo de área (urbana o rural). Quak y Van Duin (2010) describen un sistema de tarificación en el camino implementado en 2011 en Noruega, que consiste en un cargo por kilómetro en lugar de impuestos tributarios. Mientras la tecnología para el esquema de tarificación en los caminos se basa por encima de un equipo a bordo (OBE), se planea que el cargo por kilómetro dependerá de la ubicación, la hora del día, y del impacto ambiental por las características del camino. Sorensen *et al.* (2009) sugirieron que el conteo de kilómetros podría estar basado encima del consumo de combustible (usando un Puerto de diagnostico a bordo) y contabilizando el kilometraje (receptor GPS).

2.2.2 Valoración y cargo del daño al pavimento y el GPS

Bajo el criterio de los que “pagan por contaminar” Amoo-Dodoo y Thorpe (2004) proponen una metodología global y equipo para cargar a la infraestructura de una manera equitativa, eficiente y transparente. Los autores proponen medir las fuerzas dinámicas de las llantas para después simular los daños potenciales al pavimento de acuerdo a las medidas de desempeño dadas que toman en cuenta el clima y el tipo de pavimento. Mientras los autores agradecen las aproximaciones Europeas de tarificación en el pavimento e identifican un defecto básico el cual es

que estos esquemas se basan en pesos dinámicos. Para lidiar con estos defectos básicos, proponen un esquema combinado que involucra unidades de ponderación en los ejes, sistemas de comunicación y GPS por tanto la información de las fuerzas dinámicas de la llanta, posición, velocidad y fecha/hora, son enviados a una antena celular. Desde ahí los datos se transmiten a una estación central en la cual los daños potenciales al pavimento de un vehículo específico son calculados en términos de las características del vehículo y del camino. Por ejemplo, para dos vehículos con peso estático similar por eje, reportan diferencias relativas en el daño al pavimento del orden del 25% como resultado de las diferencias de velocidad y tipo de pavimento.

2.2.3 Temas concernientes a los datos GPS

Existen complicaciones en el uso de tecnologías GPS en redes carreteras, sin embargo son reportadas por Cortés *et al.* (2010) cuando sistematizan los datos de velocidad GPS en autobuses urbanos, involucrando 40 millones de posiciones solo para el análisis de la velocidad. Schuessler y Axhausen apuntan hacia la necesidad de limpiar y suavizar los datos brutos del GPS (Schuessler y Axhausen, 2010). Mientras habían inquietudes acerca de la precisión y la confiabilidad de los datos GPS (Zabic, 2006, 2009) información relacionada espacialmente se reporta como una herramienta esencial en la tarifa de tarificación del camino en el futuro cercano, específicamente en sistemas GPS (Walker and Naberezhnykh, 2009). Hoy en día, los sistemas GPS estándar son reportados que muestran errores en la distancia viajada del orden del 9% (Walker y Naberezhnykh, 2009). Los cañones urbanos se reportan como barreras para la señal GPS (EGNSSA, 2011), las cuales han detonado más investigación que inicialmente se enfocaron en medir el uso en el camino (e.g. el Consorcio GNSS en Europa) (EGNSSA, 2011).

Mientras un proceso de validación de datos GPS se reporta como necesario, técnicamente aplicaciones refinadas han sido publicadas por ejemplo, Lee *et al.* (2008) que reportan el uso de la información GPS para predecir la demanda potencial de motores automotrices como función de las variaciones en la

altitud. Las señales de los dispositivos GPS convencionales también son reportadas como satisfactorias cuando evalúan el desempeño de vehículos híbridos (Frey *et al.*, 2009). Los datos GPS son la entrada para el sistema de monitoreo de vehículos pesados en los caminos de Australia (posición, velocidad) (Koniditsiotis y Girgis, 2010) el cual se ha ampliado para registrar la masa de los vehículos.

Otra aplicación GPS exitosa es reportada por Schlingelhof *et al.* (2006). En este caso, la posición absoluta y relativa de los vehículos en la red son monitoreados para propósitos de seguridad en el camino.

Se debe notar que las técnicas no basadas en datos GPS para rutas han sido difíciles de implementar (Papageorgiou *et al.*, 2007) por ejemplo, la Identificación de etiquetas mediante Radio Frecuencia (RFID) se reporta como elementos ideales sólo para acelerar el pago en casetas de peaje (Porter and Kim, 2008).

2.2.4 Modelo del Banco Mundial

Como se ha visto dentro del desarrollo de la metodología es importante calcular dentro del modelo el consumo de combustible, lo cual es posible además de calcular otros factores como: consumo de lubricantes, consumo de llantas, salario de tripulantes, mantenimiento vehicular (mano de obra y refacciones), depreciación del vehículo, entre otras (Archondo-Callao y Faiz, 1989). Dentro de esta tesis se utilizó el modelo VOC (Vehicle Operating Cost) como una herramienta para obtener información confiable de la evaluación técnica y económica y de opciones de inversión en carreteras (Leyva *et al.*, 2002). El esquema seguido fue el mismo que utilizó el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) (Leyva *et al.*, 2002) en el que realizó segmentaciones de la Red Carretera Federal (RCF) en tramos de 500 metros.

Este modelo del BM utiliza un enfoque diferente al propuesto para el cálculo de las variables, pero se consideró como una fuente confiable para comparar resultados. Como parte del estudio se generó una macro en el lenguaje Caliper

Script de TransCAD v4.8 que se utilizó para calcular los Costos de Operación Vehicular (COV) para distintas configuraciones vehiculares (A, B, C2, C3, T3S2, T3S3 y T3S2R4) para un estudio a posteriori, pero la de interés se centra en un camión unitario de dos ejes (C2). Los datos de entrada fueron proporcionados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), específicamente para los tramos que se compararon y a su vez se generó otra macro en el software TransCAD para segmentar el trazo del GPS en segmentos de 500 metros y agregar la información de entrada necesaria para calcular el consumo de combustible.

El modelo de predicción de consumo de combustible usa el concepto de porcentaje temporal de consumo de combustible en ml/s. Los principios básicos de la combustión interna del motor sugieren que, bajo condiciones ambientales ideales la unidad de consumo de combustible es una función de la potencia de salida (en hp métricos) y de la velocidad del motor (en rpm).

Para un vehículo operando sobre una determinada sección del camino de una alineación geométrica específica, el consumo promedio de combustible está dado por:

$$FL = \alpha 1 * \alpha 2 (UFCu * LP / Vu + UFCd * (1 - LP) / Vd) \quad (2.1)$$

Donde:

UFCu es la unidad preestablecida de consumo de combustible para segmentos ascendentes, en ml/s.

UFCd es la unidad preestablecida de consumo de combustible para segmentos descendentes, en ml/s.

LP es la proporción de viaje ascendente expresado como una fracción.

$\alpha 1$ es el factor relativo de eficiencia de energía.

$\alpha 2$ es el factor de ajuste del combustible.

Vu es la velocidad estimada para segmentos ascendentes, en m/s.

Vd es la velocidad estimada para segmentos descendentes, en m/s.

Tal y como se menciona en el documento del BM el valor de $\alpha 1$, para modelos cercanos al estudio que se realizó en Brasil, se considera igual a 1, para el caso de vehículos de pasajeros, los valores cambian como en el modelo HDM

de la siguiente manera: $\alpha_1 = 0.7$, para vehículos pequeños; $\alpha_1 = 0.4$, para vehículos medios; y $\alpha_1 = 0.4$, para vehículos grandes. El factor de ajuste de combustible varia: $\alpha_2 = 1.16$, para carros; $\alpha_2 = 1.15$, para autobuses y camiones. A pesar de que se establece que no se puede deducir la forma precisa de la variable UFC a partir de consideraciones teóricas, se sabe que la función es convexa en ambos aspectos por ello en un estudio realizado en Brasil una forma cuadrática se empleó con coeficientes separados para regímenes de potencia positiva y negativa. Este experimento básicamente involucró la corrida de vehículos de prueba sobre 51 secciones carreteras previamente seleccionadas con pendientes constantes bajo diferentes cargas y con variaciones de velocidad que van desde los 10 hasta 120 km/hr (Archondo-Callao y Faiz, 1989).

La figura 2.3 muestra el efecto de la velocidad del vehículo sobre la potencia del vehículo y el consumo de combustible para un camión pesado en una tangente a nivel de un camino en buenas condiciones. En la misma figura 2.3 se aprecia que mientras la velocidad aumenta, la potencia aumenta, en parte debido a la resistencia del aire y en parte debido a la necesidad de vencer las fuerzas de resistencia a una tasa mayor; sin embargo, el consumo de combustible baja inicialmente al mínimo antes de ascender (Archondo-Callao y Faiz, 1989).

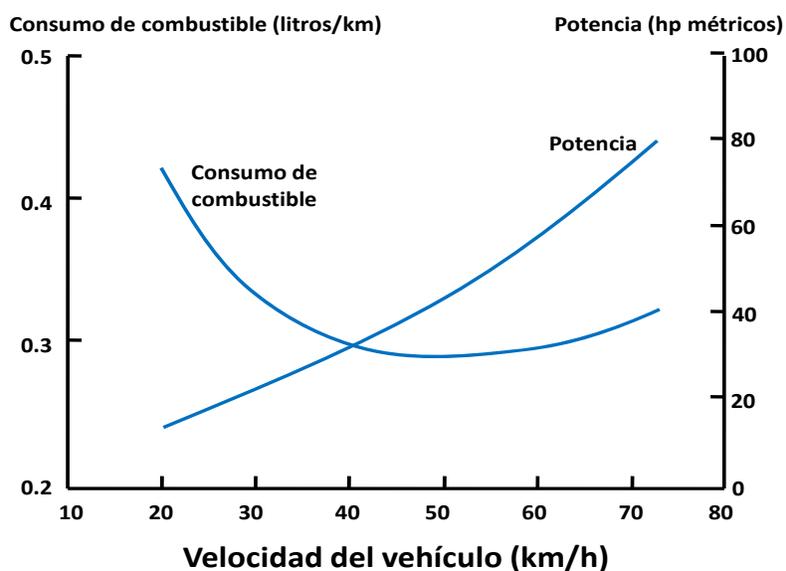


Figura 2.3. Relación entre la velocidad del vehículo, la potencia del motor y el consumo de combustible.

El VOC modela los efectos de las características físicas y condiciones del camino en las velocidades de operación de varios tipos de vehículos, en sus consumos de combustibles y lubricantes, en sus requerimientos de mantenimiento, etc., y determina sus costos totales de operación. Para efectuar esto se requiere cargar previamente los costos unitarios y con ello el modelo calcula las cantidades consumidas de recursos, tales como litros de combustible, número de llantas, horas-hombre (h-h) de trabajo, la velocidad del vehículo (que está en función de las características del tipo de vehículo, la geometría del camino, la superficie de rodamiento y la condición actual del camino) (Leyva *et al.*, 2002). La metodología seguida para el cálculo de la velocidad, uso de recursos y costos de operación para un tipo de vehículo dado y una sección de camino dada sigue los siguientes pasos (Leyva *et al.*, 2002):

1. Calcular la velocidad de operación promedio para el vehículo seleccionado.
2. Calcular las cantidades de recursos utilizadas por cada 1,000 vehículos-kilómetro (veh-km) para los siguientes componentes:
 - Consumo de combustibles
 - Consumo de lubricantes
 - Consumo de llantas
 - Tiempo de los tripulantes
 - Tiempo de los pasajeros
 - Tiempo o retención de la carga
 - Mano de obra o de mantenimiento
 - Refacciones
 - Depreciación
 - Interés
 - Indirectos

3. Aplicar costos unitarios a las cantidades consumidas de recursos para obtener el costo de operación por cada 1,000 veh-km para cada componente.
4. Sumar los costos de operación para cada componente con el fin de calcular el costo de operación vehicular total por cada 1,000 veh-km.

Se actualizaron los datos del SIGCOV MEX 1.0 para los valores del script de TransCAD y las tablas asociadas a la macro. Al correr la macro se crea una carpeta llamada COV la cual contiene los siguientes datos:

Los resultados que arroja este modelo, para cada tipo de vehículo, se listan a continuación:

- Tiempo de viaje para cada tipo de vehículo
- IRI promedio en la ruta
- Peaje para cada tipo de vehículo
- COV para cada tipo de vehículo
- Velocidad de operación promedio para cada tipo de vehículo
- COV por cada 1000 vehículos kilómetro para cada tipo de vehículo
- Consumo de combustible (litros)
- Uso de lubricantes (litros)
- Tiempo de los operarios (horas)
- Tiempo de los pasajeros (horas)
- Retención de la carga (horas)
- Mano de obra de mantenimiento (horas)
- Refacciones (% precio vehículo nuevo)
- Depreciación (% precio vehículo nuevo)
- Intereses (% precio vehículo nuevo)
- Consumo de combustible (\$)
- Uso de lubricantes (\$)
- Consumo de llantas (\$)

- Tiempo de los operarios (\$)
- Tiempo de los pasajeros (\$)
- Retención de la carga (\$)
- Mano de obra de mantenimiento (\$)
- Refacciones (\$)
- Depreciación (\$)
- Intereses (\$)
- Costos indirectos (\$)

Los resultados de este modelo se describirán en el apartado de resultados para la respectiva comparación con el modelo propuesto.

2.3 Efecto ambiental causado por los vehículos

Las emisiones emitidas por los vehículos al ambiente y los efectos asociados sobre la temperatura del planeta y la salud de los habitantes, constituyen vertientes de las externalidades del transporte carretero que depende de los combustibles fósiles, lo cual ha sido reconocido desde tiempos relativamente lejanos (EPA, 1991). Otras externalidades incluyen el ruido y contaminaciones marginales pero de impacto en la salud de los habitantes, tales como el hule de las llantas que se emite al ambiente; o los accidentes y sus nocivas consecuencias (Garrido, 2008).

Los niveles de emisión de los vehículos sobre el ambiente son función de un cúmulo de factores, asociados al vehículo, al estilo de manejo y a otros factores que se podrían asociar a la infraestructura y al tráfico. Una conducción agresiva, caracterizada por ejercer niveles de aceleración y frenado elevados, se sabe, influye sobre la eficiencia con la que es quemado el combustible, involucrando diferenciales comparativos de 3 a 1 cuando se compara con una conducción técnica, caracterizada ésta por aplicar niveles de aceleración y frenado moderados (Rafael *et al.*, 2006).

El consumo de combustible asociado a los patrones de aceleración ha sido reportado igualmente por Rafael *et al.*, (1996), en términos del uso dado del máximo nivel de aceleración disponible: el usar de un 30 a un 60% de tal nivel máximo se considera en términos generales como un manejo amable con el ambiente. Al respecto, un esquema de cálculo de la agresividad del manejo, basado en datos GPS de la velocidad de circulación, ha sido propuesto en términos del área bajo la curva de aceleración y de sobre-velocidad, en el contexto de análisis de riesgos (Boquete *et al.*, 2010).

2.3.1 GPS y emisión de contaminantes

Noland *et al.* (2011) reportan un sistema de monitoreo del rendimiento y emisiones de los vehículos (VPMS por sus siglas en Inglés), el cual combina equipo estacionario y diferentes sensores de emisiones, con objeto de caracterizar el efecto del modo de manejo sobre las emisiones vehiculares. Se trata de un sistema en tiempo real, con salidas que incluyen la velocidad del vehículo, las *rpms* del motor y la posición del acelerador, así como las emisiones de gases CO / NOx. Con tales datos es posible caracterizar el promedio de las emisiones contaminantes, como una función de los rangos de velocidad. Los autores encuentran que durante el frenado, el nivel de emisiones de CO es comparable a aquellas a velocidad constante o de crucero, mientras que durante los episodios de aceleración las emisiones de gases NOx son 23% mayores respecto a etapas de desaceleración, y 50% mayores respecto a la circulación a velocidad constante o crucero.

Por otro lado, bajo el proyecto MESSAGE (*Mobile Environmental Sensing System Across Grid Environments*), las emisiones y los datos GPS son registrados de manera simultánea, con objeto de caracterizar los efectos ambientales de los vehículos con relación al ruido y a las emisiones (IC, 2011). Aunque este sistema no está diseñado para ser usado para propósitos de tarificación, bien podría ser considerado para ese fin, en la medida que la ciencia de la Telemática pudiera proveer a la ingeniería de caminos con sistemas capaces de administrar

información real del tráfico, involucrando en ello tráficos reales del orden de miles de vehículos (Cassias y Kun, 2007). Al respecto, la unidad de control del motor (ECU por sus siglas en Inglés), representa una fuente de información acerca de situaciones específicas, tales como la marcha en vacío del motor o de maniobras de frenado brusco (Marmy, 2010).

Quoy y Jacob (2010) describen un impuesto a ser implementado en Francia, con objeto de hacer racional el uso de las infraestructuras. Este sistema se basa en un sistema GNSS (*Global Navigation Satellite System*) a bordo de la unidad, con objeto de rastrear la posición del vehículo. Actualmente se plantea hacer una tarificación por km recorrido, con base a las características del vehículo: número de ejes, peso bruto vehicular máximo permitido, y características de eficiencia en el uso del combustible.

2.3.2 Emisiones del vehículo y estilos de manejo

Como resultado de los estilos de manejo y características de la infraestructura, North *et al.* (2005) reportan sitios de concentración de contaminantes, así como una serie de características de emisiones vehiculares (episódicas y sensitivas para patrones de operación). Eso es, mientras la interacción vehículo-conductor influye en los niveles de emisiones, eventos cortos de contaminantes pueden dominar los niveles de emisiones globales. Para este autor, las actitudes del conductor influyen en las tasas de emisiones, el manejo agresivo y aceleraciones innecesarias que conducen a diferencias relativas de emisiones por encima de 10 a 1.

2.3.3 Modelado de las emisiones vehiculares

Ahn *et al.* (2002) usaron datos GPS para estimar el consumo de combustible y emisiones en función de la velocidad instantánea y aceleración, combinado con un modelo de regresión de consumo de combustible. La eficiencia con la cual el combustible es consumido, y las emisiones liberadas dentro del

entorno, son de esta manera una función compleja del vehículo y de las condiciones y características de la infraestructura, así como el estilo de manejo.

Hine *et al.* (2000) reportan un software dedicado a la simulación del consumo de combustible de vehículos en áreas congestionadas, sobre la base de perfiles de velocidad, encontrando que un elemento de contribución particular para las emisiones es la estadística de dispersión de la aceleración. Sin embargo, Hellinga y Chan (2002) reportan limitaciones en modelos de predicción similares, incluyendo la no consideración de arranques en frío, gradientes verticales o cargas secundarias en el motor.

2.3.4 Modelado con Mobile 6

Durante la búsqueda de bibliografía se encontró que la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos (*Environmental Protection Agency – EPA*) distribuye un software denominado Mobile 6, el cual permite predecir las emisiones en gramos/milla de una serie de gases contaminantes: hidrocarburos (HC), monóxidos de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxidos de carbono (CO₂) y otras partículas en distintos tipos de vehículos bajo distintas condiciones. Mobile 6 calcula los factores de emisión para 28 tipos de vehículos en las regiones de Estados Unidos con elevaciones altas y bajas; los factores estimados dependen de varias condiciones tales como, temperaturas del ambiente, velocidades de viaje, modos de operación, volatilidad del combustible y las tasas de aumento de millaje. Los parámetros de entrada de Mobile 6 son:

- Año civil
- Mes
- Temperatura horaria
- Altitud (punto bajo o alto)
- Fin de semana / entre semana
- Características del combustible (presión del vapor, contenido de azufre, contenido de oxigenación, etc.)
- Humedad y carga solar

- Distribución del registro de edad por clase de vehículo
- Acumulación de millas anuales por tipo de vehículo
- Fracciones de venta de diesel por clase de vehículo y modelo
- Distribución de velocidad promedio por hora y camino
- Distribución de millas vehículo viajadas por tipo de vehículo
- Arranque del motor por día por tipo de vehículo y distribución por hora
- Distribución del tiempo de arranque del motor por hora
- Distribución de los viajes por hora
- Distribución promedio de la longitud del viaje
- Distribución de las millas vehículo viajadas por tipo de vehículo
- Distribución matutina por hora completa, parcial o múltiple
- Descripción del programa de inspección y mantenimiento (I/M)
- Fracciones de gas natural por vehículo
- Hidrocarburos de salida
- Truncamiento de tamaño de partícula
- Factores de emisión para PM y HAPs
- Especificaciones y selecciones del formato de salida

Al momento de probar la emisión de contaminantes del recorrido evaluado mediante este sistema, se encontró el inconveniente de conseguir la cantidad de información durante el recorrido mencionados anteriormente, pero se decidió utilizar los valores que el software utiliza por default. El segundo inconveniente hallado fue localizar los vehículos equivalentes de la clasificación vehicular en México con respecto a la clasificación de la EPA. Una muestra de la clasificación vehicular utilizada en el software Mobile 6 se lista en la Tabla 2.1, la cual muestra también la propuesta de equivalencia en los vehículos clasificados por la SCT.

Tabla 2.1. Clasificación vehicular en Mobile 6 utilizada por la EPA.

No.	Abreviación	Descripción	Equivalencia
19	HDDV5	Class 5 Heavy-Duty Diesel Vehicles (16,001-19,500 lbs. GVWR)	C2
20	HDDV6	Class 6 Heavy-Duty Diesel Vehicles (19,501-26,000 lbs. GVWR)	C3
21	HDDV7	Class 7 Heavy-Duty Diesel Vehicles (26,001-33,000 lbs. GVWR)	T3S2
22	HDDV8a	Class 8a Heavy-Duty Diesel Vehicles (33,001-60,000 lbs. GVWR)	T3S3
23	HDDV8b	Class 8b Heavy-Duty Diesel Vehicles (>60,000 lbs. GVWR)	T3S2R4
24	MC	Motorcycles (Gasoline)	--
25	HDGB	Gasoline Buses (School, Transit and Urban)	--
26	HDDBT	Diesel Transit and Urban Buses	B
27	HDDBS	Diesel School Buses	--
28	LDDT34	Light-Duty Diesel Trucks 3 and 4 (6,001-8,500 lbs. GVWR)	OTROS

Una de las ventajas encontradas por parte del Mobile 6 es que se encuentra disponible como una herramienta de análisis en el software TransCAD. No obstante, el inconveniente es que las estimaciones realizadas se limitan a lo reportado por el modelo de asignación, por ello es que la eficiencia del modelo depende de una buena representación vehicular del modelo.

Dado que se trabajó con un tramo carretero en México, el valor asignado a los caminos fue "Freeway", siendo los datos de entrada del modelo Mobile 6 utilizados fueron los mostrados en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Datos de entrada para estimar emisiones contaminantes con Mobile 6.

Año	2011
Mes	Enero
Altitud	Baja
Temperatura Mínima (F)	60
Temperatura Máxima (F)	94
Humedad Absoluta (grains/lb)	75
Combustible nominal RVP (psi)	9
Aireado RVP (psi)	8.6
Contenido de azufre en combustible (ppm)	30

Los resultados promedio arrojados para un vehículo unitario de dos ejes en el tramo seleccionado son: 1.4355 g/mi de CO; y 3.5732 g/mi de NOx y 0.3759 g/mi de VOC.

2.4 Discusión

Dentro de la revisión de la bibliografía se destacan los siguientes puntos:

- De acuerdo con Hu, la topología de la red es un punto determinante del número de sensores a ser instalados. Este autor toma en cuenta la topología de la red mientras otros autores evalúan la ubicación de los sensores mediante el flujo en los arcos.
- Las reglas de Yang y Zhou son propuestas de acuerdo a la experiencia en el manejo de modelos de asignación, pero no de manera matemática. La primera y la cuarta regla se satisfacen siempre en cualquier distribución de sensores mientras que las otras dos reglas son más difíciles de satisfacer porque ellas frecuentemente entran en conflicto con las otras reglas por tanto las reglas dos y tres no pueden ambas ser satisfechas completamente.
- El método de Yang asume que los conteos en los arcos están libres de error lo cual significa que habría un error siempre en la ubicación de los sensores si la variación del tiempo y del tráfico se toman en cuenta.
- La mayoría de estos métodos son estáticos y ninguno de ellos toma en cuenta la variación del tiempo excepto por los métodos que utilizan simulación.
- La mayoría de estas técnicas son aplicadas sobre redes con pocos arcos y centroides.
- Algunas de estas metodologías resuelven el problema utilizando heurísticas en lugar de utilizar programación lineal.
- La mayoría de estas metodologías no toman en cuenta externalidades como el daño al pavimento o al medio ambiente.

- Las metodologías existentes no evalúan las características del camino tales como: altitud, curvatura, consumo de combustible, estilo de manejo, aceleraciones, estilo de manejo o velocidad deseada.
- Las metodologías propuestas hasta la fecha no utilizan técnicas de optimización como son los modelos de estrategias evolutivas como los Algoritmos Genéticos (GA) sin embargo, estas técnicas son deseables ya que encuentran soluciones globales y no locales como sucede con los modelos de programación lineal o entera.
- Estas revisiones bibliográficas han incluido, discutido y analizado temas asociados con la ubicación óptima de sensores para estimar matrices OD y se muestran las propuestas de solución así como, factores importantes que pueden ser tomados en cuenta de manera efectiva las restricciones de presupuesto y la cobertura OD.
- El objetivo de dar estas recomendaciones es para tener un mejor entendimiento de cuál de estos puede ser tomado en cuenta cuando un sensor pueda ser localizado en una red real.
- La investigación futura se enfocará a establecer la relación entre las características de los arcos y la ubicación de los sensores tomando en cuenta la regla de intercepción y la regla de la fracción de flujo máximo en varios tipos de redes. Además, las investigaciones a futuro deben tomar en cuenta subconjuntos de redes, soluciones globales y un enfoque diferente para obtener información de las redes por ejemplo la ubicación de pesadoras dinámicas para un tipo de vehículos en específico en un determinado tipo de camino y para algunas condiciones específicas del pavimento.
- Pocas de estas metodologías utilizan un SIG y sus herramientas para analizar el NSLP con un diferente punto de vista como lo es la topología o la accesibilidad.
- La revisión bibliográfica anterior ha descrito familias de equipo y enfoques para la tarificación en caminos y al medio ambiente que en cierta forma dan a conocer el gran interés en la tarificación al

camino, a pesar de no tener un consenso acerca de su definición. Usando sistemas GPS también se presentan posiciones contradictorias, con diferentes niveles de desempeño reportados. Sin embargo, parece que tales sistemas serán la tecnología más importante para valorar el camino y el medio ambiente.

- Por otro lado, mientras hay aproximaciones exhaustivas que toman en consideración temas de infraestructura o ambientales concernientes al tarificación del camino, no se ha encontrado un reporte que combine metodologías ambientales y del camino y muchos factores que influyen aun estarían faltando en el análisis, particularmente el estilo de manejo.
- Como se mostró en párrafos anteriores, se resalta la necesidad de desarrollar un modelo que evalúe la cantidad de emisiones contaminantes de forma particular y que se base en el estilo de manejo de cada usuario del camino.
- Desafortunadamente, y como ya se indicó, los resultados arrojados por el Mobile 6 dependen en gran medida del grado de exactitud del modelo de asignación, sin embargo se pretende ampliar en un futuro las capacidades del modelo propuesto para el cálculo de las emisiones contaminantes.
- La presente propuesta trata de alguna manera, de corregir las limitaciones halladas en los sistemas existentes para la tarificación en el camino.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL SIMULADOR Y DEL MODELO DEL EFECTO AMBIENTAL Y DAÑO A PAVIMENTO

La simulación constituye la puesta en marcha de un modelo, y puede tener diversas naturalezas que incluyen a los modelos analógicos, matemáticos y a escala. En este capítulo se revisa un modelo desarrollado de la interacción dinámica de los vehículos con el pavimento, al cual se le identifican algunos fenómenos deseables de ser considerados para el desarrollo de la métrica integral alrededor del cual versa esta tesis.

La formulación que se le integra al modelo matemático consiste de las fuerzas de tracción, que actúan en la interfaz llanta-pavimento, como una función de diversas propiedades del vehículo y del pavimento, así como de las condiciones de operación. La parte del modelo de interacción vehículo – pavimento que es alterado para considerar estos pares de tracción, son el modelo de pavimento y la formulación para la energía de deformación de los elementos discretos de pavimento, en los cuales se ha discretizado el pavimento.

A continuación se describen los modelos existentes por cuanto a la respuesta dinámica de los vehículos sobre el perfil del pavimento, y a la respuesta dinámica del pavimento. Se presenta la formulación del efecto de los pares de tracción sobre la cantidad de energía almacenada en el pavimento. Estas formulaciones fueron programadas en la plataforma computacional existente, y realizados diversos análisis paramétricos.

La tarificación del daño al pavimento y ambiental son dos conceptos que han sido considerados para controlar el grado de emisiones y el rápido deterioro de los caminos. Mientras la tarificación en los caminos involucra diferentes conceptos incluyendo el congestionamiento y el costo de mantenimiento del camino, el costo ambiental se enfoca en gases de emisión de invernadero. Una medida de costo a tomar en cuenta para ambos, el daño al pavimento y el ambiente no ha sido propuesta aún. En esta tesis una metodología basada en datos GPS se propone para evaluar la tarificación del daño al pavimento y al medio ambiente. Los datos GPS son usados para simular el impacto en los

caminos y en el medio ambiente, a través de la medición de la velocidad, la elevación sobre el nivel del mar, y el curso de los datos del GPS. El impacto ambiental es medido en términos del consumo de combustible mientras que el daño al pavimento se formula en términos de la energía de tensión almacenada dentro del pavimento debido a las cargas de los neumáticos. Las aplicaciones de esta metodología confirma la importancia del estilo de manejo en el consumo de combustible, en sí, los estilos de manejo primordialmente determinan la dispersión de la aceleración (35% de incremento en la dispersión lo que induce un incremento del 21% en el consumo de combustible). Sin embargo, el efecto en el pavimento y el consumo de combustible no correlacionan el uno con el otro en el caso del pavimento asfáltico de modo que el precio debe ser establecido en términos absolutos para ambos efectos, en la perspectiva de los límites de velocidad predominante establecida.

En general un conjunto de variables y propiedades afectan el consumo de combustible y las emisiones asociadas, incluyendo: las características de manejo (velocidad, tasas de aceleración, cambios de velocidad, estilos de manejo); características del vehículo (tamaño del motor, tipo e combustible, carga útil y edad); geometría del camino; y condiciones meteorológicas (temperatura y velocidad y dirección del viento) (Palmer, 2007). En particular el estilo de manejo ha sido reconocido como un factor significativo de contribución para el congestionamiento, accidentes y las emisiones locales y globales (Bonsall y Knockaert, 2008; Handy y Krizek, 2009; Vreeswijk *et al.*, 2010). En medio de específicas “reglas de oro” para ahorrar combustible y reducir emisiones, están aceleraciones y frenados suaves manteniendo velocidades estables (ECOWILL, 2010). Los beneficios potenciales de realce del comportamiento del manejo implican beneficios en la seguridad, beneficios al medio ambiente, beneficios financieros y sociales, incluyendo ahorros en combustible (5-15% en el largo plazo), menores costos de mantenimiento del vehículo, costos por accidente reducidos, emisiones de CO₂ reducidas, y menos fatiga durante el manejo (ECOWILL, 2010). En lo que respecta a la conexión del estilo de manejo con el

daño al pavimento por las fuerzas de los neumáticos, ambas tangencial y normal, distintivamente asociadas a los estilos de manejo, afectan y dañan al pavimento.

Mientras ha habido esfuerzos substanciales para establecer políticas de tarificación que toman en cuenta tanto el daño a la infraestructura y el consumo de combustible, no hay aun una metodología integral que apunte a evaluaciones de forma simultánea daño al ambiente y daño al camino. Una metodología integral sería conveniente para definir las tarifas, objetivos y políticas de tarificación efectivas.

En esta tesis una metodología basada en un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es propuesta para estimar el impacto ambiental y el daño al pavimento derivado para el uso del camino. Los datos GPS son usados para simular tanto la respuesta dinámica del vehículo como las aceleraciones laterales y longitudinales, así como el consumo de combustible. Una revisión global de la literatura se presenta, la cual provee elementos que justifican la metodología propuesta.

3.1 Descripción del modelo

Una descripción es presentada de las dos formulaciones principales que describen el esquema de simulación para evaluar el camino y los efectos ambientales de los vehículos pesados: la formulación del consumo de combustible y el modelado de la respuesta dinámica del vehículo a las aceleraciones laterales y longitudinales. Los grados de libertad del modelo vehicular incluyen elasticidad, rodadura y pendiente. Inicialmente, las salidas del GPS son descritas, las cuales se convierten en las entradas del modelo.

3.2 Datos GPS

Los dispositivos GPS proveen información acerca de la posición y características acerca de la ruta, disponible en formato ASCII. La Tabla 3.1 lista las propiedades del camino provistas por cualquier sistema comercial GPS,

incluyendo el posicionamiento en términos de latitud y longitud y elevación, así como el curso del tramo y la hora. Mientras el dispositivo puede ser establecido para adquirir datos a una frecuencia de 1 Hz, tales configuraciones dependen de la disponibilidad de los satélites. Como se mencionó en la revisión de la literatura, un proceso de validación es obligado como algunos puntos de la ruta perdidos resultado de las barreras como son pasos a desnivel y otras construcciones.

Tabla 3.1: Datos de salida del GPS

Índice	Tiempo	Elevación	Distancia del tramo	Tiempo del tramo	Velocidad del tramo	Curso del tramo	Posición
73	18/12/2010 14:18	2587 m	30 m	00:00:01	108 km/h	116° true	N20 04.230 W99 36.357

3.3 Diagrama de bloques del modelo propuesto

La Figura 3.1 describe los módulos completos para el esquema híbrido propuesto que evalúa el pavimento y el daño ambiental para un determinado vehículo sobre el camino. El bloque punteado se refiere a la estrategia de evaluación futura, como en el momento presente se mide indirectamente el efecto al medio ambiente en términos del consumo de combustible.

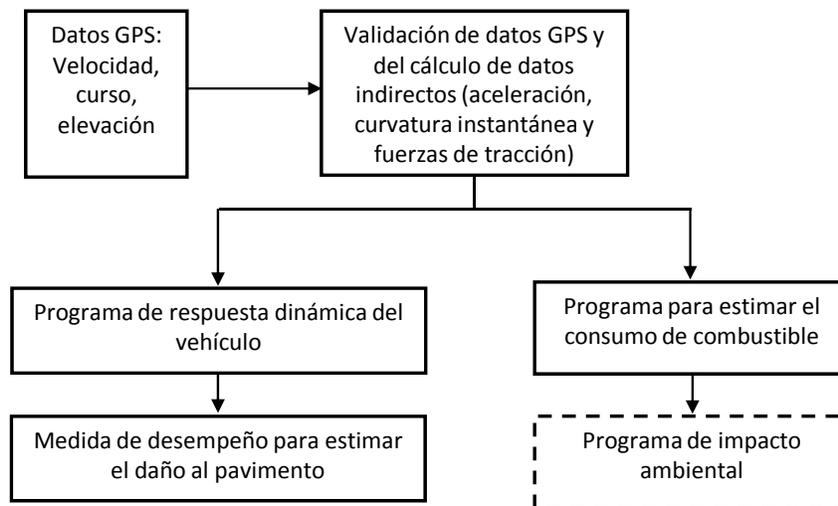


Figura 3.1. Diagrama de flujo para el modelado de la tarificación al camino y al medio ambiente.

3.4 Modelado del impacto ambiental de los vehículos

La formulación seleccionada para estimar el consumo de combustible es como sigue (Akçelik y Besley, 2008).

$$\begin{aligned} \Delta F &= \alpha + \beta_1 R_T v + \left\{ \left(\beta_2 M_v a_F^2 v / 1000 \right)_{a>0} \right\} \Delta t && \text{para } R_T > 0 \\ \Delta F &= \alpha \Delta t && \text{para } R_T \leq 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

Donde:

- R_T : Fuerza tractiva total (kN) requerida para manejar el vehículo,
- M_v : Masa del vehículo (kg),
- v : Velocidad instantánea (m/s)
- a_F : Tasa de aceleración instantánea (m/s^2), negativa para desaceleración,
- α : Tasa constante de combustible no utilizado (mL/s), como un estimado para mantener el motor operando,
- β_1 : El parámetro de eficiencia el cual relaciona el consumo consumido de gasolina a la energía provista por el motor (mL/kJ), y
- β_2 : El parámetro de eficiencia el cual relaciona el consumo de combustible durante la aceleración positiva (mL / (kJ m/s^2)).

Durante la aceleración positiva, la fuerza tractiva total está relacionada a la fuerza inercial ($F_a = M_v a_F$). Durante la aceleración cero, la fuerza tractiva necesaria es solo la necesaria para vencer la resistencia al empuje y a la rodadura, así como la fuerza gravitacional asociada a la pendiente positiva. Durante la desaceleración mínima el consumo de combustible es considerado (α).

3.5 Respuesta vehicular a la aceleración longitudinal y lateral

Mientras diferentes programas de computadora y simulaciones debieran ser desarrollados para simular cada vehículo sencillo sobre el camino, un vehículo genérico de dos ejes tipo camión recto es considerado preliminarmente para evaluar los daños potenciales al pavimento por los vehículos.

Los datos levantados a través del GPS constituyen las perturbaciones al modelo del vehículo seleccionado como sigue: aceleración longitudinal (a_F) la cual causa transferencia de carga, cambio en la dirección o en el curso, causando una aceleración lateral (a_L); y el cambio en la elevación (CE). La figura 3.2 ilustra las fuerzas y aceleraciones actuando en el vehículo durante su viaje a lo largo de una pendiente positiva.

La figura 3.3 ilustra una representación diagramática para el vehículo, involucrando una representación de ocho grados de libertad la cual es sujeta a perturbaciones direccionales y longitudinales.

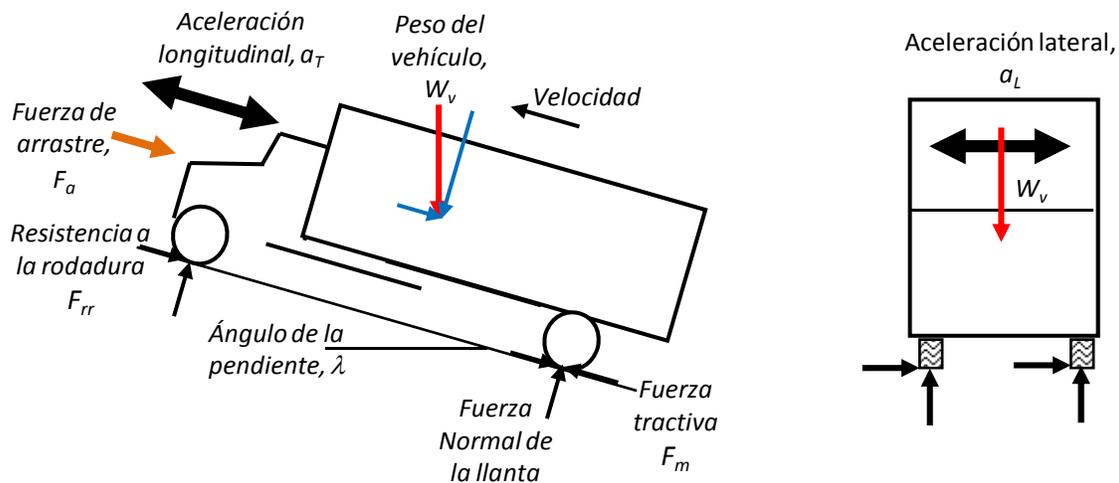


Figura 3.2. Diagrama de fuerzas y aceleraciones en un vehículo genérico.

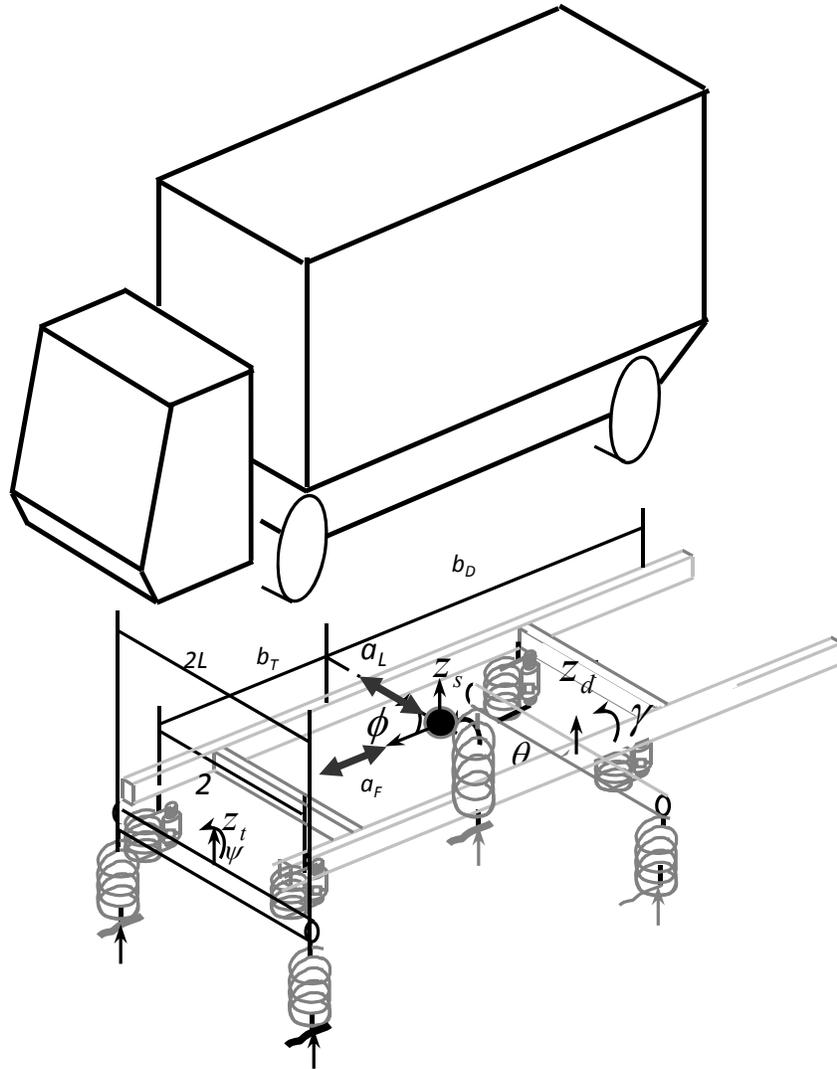


Figura 3.3. Representación diagramática del modelo de balanceo y rebote en pendiente del vehículo.

Los grados de libertad para el vehículo corresponden a la posición vertical de la masa inclinada (z_s); del movimiento de inclinación de la masa inclinada (θ); del movimiento de balanceo de la masa inclinada (ϕ); de la posición vertical del eje trasero (z_T); del movimiento de balanceo del eje trasero (ψ); de la posición vertical del eje frontal (z_D); y del movimiento de balanceo del eje frontal (γ). Las ecuaciones de movimiento resultan como sigue:

$$\begin{aligned}
m_s \ddot{z}_s &= z_s(-2k_{st} - 2k_{sd}) + \theta(-2k_{st}b_T - 2k_{sd}b_D) + z_T(2k_{st}) + z_D(2k_{sd}) + \\
&\dot{z}_s(-2c_{st} - 2c_{sd}) + \dot{\theta}(-2c_{st}b_T - 2c_{sd}b_D) + \dot{z}_T(2c_{st}) + \dot{z}_D(2c_{sd})
\end{aligned} \tag{3.2}$$

$$\begin{aligned}
I_{ys} \ddot{\theta}_s &= \phi(-2k_{sd}b_D + 2k_{st}b_T) + \theta(-2k_{sd}b_D^2 - 2k_{st}b_T^2) + z_D(2k_{sd}b_D) + \\
&+ z_T(-2k_{st}b_T) + h_{rc}a_F m_s + \dot{\phi}(-2c_{sd}b_D + 2c_{st}b_T) + \dot{\theta}(-2c_{sd}b_D^2 - 2c_{st}b_T^2) + \\
&\dot{z}_D(2c_{sd}b_D) + \dot{z}_T(-2c_{st}b_T)
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned}
I_{xs} \ddot{\phi}_s &= \phi(-2k_{st}\ell^2 - 2k_{sd}\ell^2) + \psi(2k_{st}\ell L) + \gamma(2k_{sd}\ell L) + R_c a_L m_s + \\
&+ \dot{\phi}(-2c_{st}\ell^2 - 2c_{sd}\ell^2) + \dot{\psi}(2c_{st}\ell L) + \dot{\gamma}(2c_{sd}\ell L)
\end{aligned} \tag{3.4}$$

$$\begin{aligned}
m_T \ddot{z}_T &= z_s(2k_{st}) + \theta(-2k_{st}b_T) + z_T(-2k_{lt} - 2k_{st}) + \dot{z}_s(2c_{st}) + \dot{\theta}(-2c_{st}b_T) + \\
&\dot{z}_T(-2c_{lt} - 2c_{st})
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$I_{xt} \ddot{\psi} = \phi(2k_{st}\ell^2) + \psi(-2k_{st}\ell L - 2k_{lt}L^2) + \dot{\phi}(2c_{sd}\ell^2) + \dot{\psi}(-2c_{sd}\ell L - 2c_{ld}L^2) \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
m_T \ddot{z}_D &= z_s(2k_{sd}) + \theta(2k_{sd}b_D) + z_D(-2k_{ld} - 2k_{sd}) + \dot{z}_s(2c_{st}) + \dot{\theta}(2c_{sd}b_D) + \\
&\dot{z}_D(-2c_{ld} - 2c_{sd})
\end{aligned} \tag{3.7}$$

$$I_{xt} \ddot{\gamma} = \phi(2k_{sd}\ell^2) + \gamma(-2k_{sd}\ell L - 2k_{ld}L^2) + \dot{\phi}(2c_{sd}\ell^2) + \dot{\gamma}(-2c_{sd}\ell L - 2c_{ld}L^2) \tag{3.8}$$

En estas ecuaciones, k y c representan las propiedades de rigidez y de amortiguamiento de los componentes del vehículo, respectivamente, mientras los subíndices representan su posición en el vehículo y el tipo de componente (l : llanta; s : suspensión; t : parte trasera; d : parte frontal). R_c y h_{rc} en estas ecuaciones representan las dimensiones del centro del balanceo y pendiente, respectivamente. La aproximación de la matriz de transición fue considerada para resolver estas ecuaciones (Meirovitch, 1986). Se debe notar que no se considera perturbación del pavimento hasta este punto. La tabla 3.2 lista las propiedades del vehículo considerado.

Tabla 3.2 Propiedades del vehículo.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
m_s	10000 kg	k_{st}	1200000 N/m	I_{xt} Eje trasero	2000 kg m ²
m_T	1500 kg	c_{sd}	5000 Ns/m	I_{xs} Balanceo	15000 kg m ²
m_D	600 kg	c_{st}	20000 Ns/m	I_{ys} Pendiente	160000 kg m ²
k_{ld}	650000 N/m	ℓ	0.48 m	I_{xd} Eje frontal	2000 kg m ²
k_{lt}	1300000 N/m	L	0.75 m	b_T	1.4 m
k_{sd}	600000 N/m	b_D	1.2 m		

El modelo del daño al pavimento se basa en la simulación de las fuerzas puestas en la llanta simulada en un modelo discreto simplificado el cual consiste en revestimientos asfálticos que descansan sobre un suelo rígido como se muestra en la figura 3.4. Los elementos del pavimento están sujetos a fuerzas normales y tangenciales, como resultado de las condiciones de manejo y de la vibración del vehículo.

La energía de tensión almacenada transitoriamente dentro del revestimiento del pavimento han sido halladas que se relacionan con el daño al pavimento (Romero y Lozano, 2006). Mientras modelos similares reportados consideran solamente la energía normal de tensión, en esta tesis la formulación se complementa para incluir la energía de tensión de cizalladura asociada a la fuerza tractiva tangencial o fuerza de frenado. Ambas deformaciones se ilustran en la Figura 3.5.

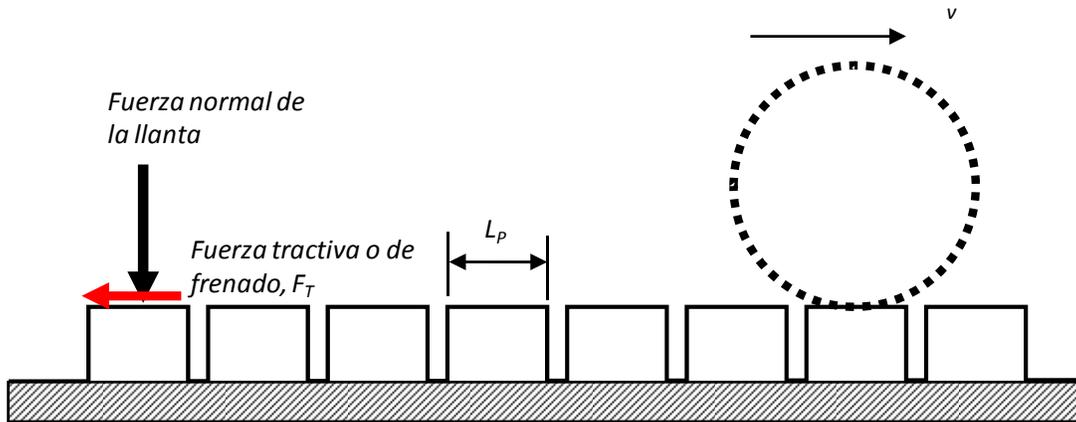


Figura 3.4 Representación diagramática de un modelo simplificado de pavimento flexible (Romero y Lozano, 2006).

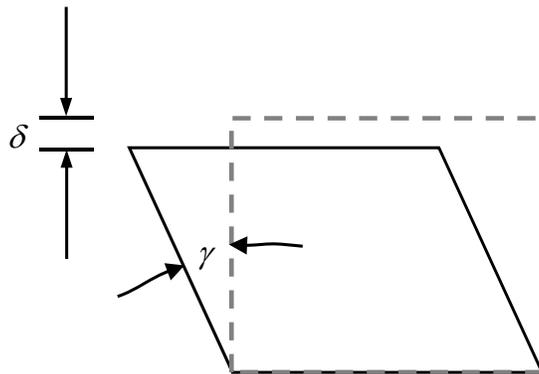


Figura 3.5 Deformaciones de cizalladura y normal en un elemento del pavimento.

La energía normal de tensión es una función del estrés normal σ en la interfaz revestimiento-llanta, como sigue:

$$E_A = \sigma^2 / E_D \quad (3.9)$$

Donde:

E_D es el modelo de elasticidad dinámico, como una función de las propiedades de diferentes pavimentos y tasas de carga (tiempo) (Collop, 1994). Las propiedades del pavimento afectan el módulo de elasticidad E el cual incluye la temperatura de la carpeta asfáltica y la temperatura de ablandamiento,

contenido vacío e índice de penetración. La energía de tensión de cizalladura U es dada por la siguiente ecuación:

$$U = \frac{1}{2G_D} \tau^2 \quad (3.10)$$

Donde:

τ Es la fatiga tangencial en la interfaz llanta pavimento, y

G_D Es el modulo de rigidez dinámico para el material. Se asume que G_D sigue la siguiente relación estándar:

$$G_D = \frac{E_D}{2(1+\nu)}, \text{ donde: } \nu \text{ es la razón de Poisson, la cual es considerada}$$

como 0.4 para la mezcla asfáltica (Long y Theyse, 2004).

La fatiga tangencial τ es una función de la fuerza de contacto tangencial F_T y del área de contacto llanta-pavimento, la cual se asume como constante. F_T puede cambiar de signo como una función de las maniobras de aceleración o desaceleración. Eso es, F_T consiste en la fuerza inercial cuando la aceleración es diferente de cero mientras que cuando el vehículo viaja a velocidad constante; es igual a la suma de las fuerzas de empuje, resistencia a la rodadura y gravitacional.

La fuerza de empuje está dada por la siguiente ecuación:

$$F_v = C_D A_p \frac{\rho}{2} V^2 \quad (3.11)$$

Donde:

C_D es el coeficiente de empuje para el tipo de vehículo considerado; A_p es el área frontal del vehículo; V es la velocidad del vehículo; y ρ es la densidad del aire.

La fuerza de resistencia a la rodadura es calculada sobre las bases de diferentes parámetros empíricos, como sigue (Rakha *et al.*, 2001):

$$F_{rr} = C_r (c_2 V_{kph} + c_3) (W) (0.001) \quad (3.12)$$

Donde:

V_{kph} es la velocidad del vehículo (km/h);

W es el peso instantáneo del vehículo (kN);

C_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura, como una función de las condiciones del pavimento (2.25 para pavimento asfáltico en condiciones uniformes);

c_2 y c_3 son constantes de rodadura, como una función del tipo de superficie y tipo de llanta (0.0328 y 4.575, respectivamente para una llanta radial).

La componente longitudinal del peso del vehículo, F_W , está dada por:

$$F_W = W \operatorname{seno} \lambda \quad (3.13)$$

Donde λ es la pendiente instantánea del camino.

La perturbación de la aceleración lateral para el movimiento de rodadura del vehículo (ecuación 3.14), es calculada de los datos del curso del GPS, como se muestra en la figura 3.6. Los datos del GPS incluyen cambio de curso ($d\theta$), y Delta x , por lo tanto la perturbación de aceleración lateral para el vehículo está dada por:

$$a_L = \frac{V^2}{\rho} \quad (3.14)$$

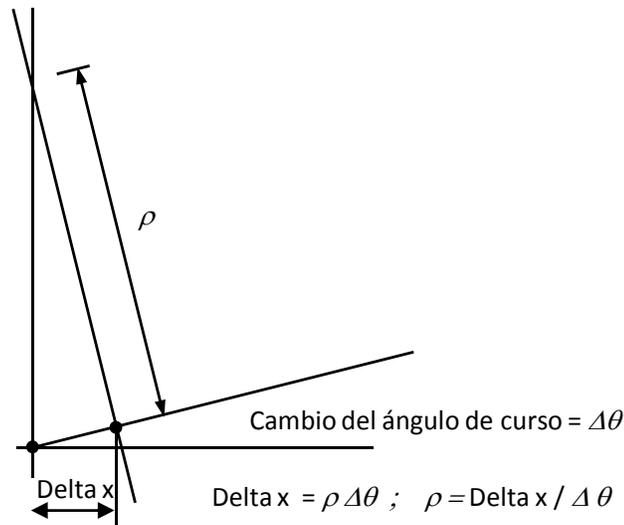


Figura 3.6. Derivación del recorrido instantáneo del radio de curvatura.

Hasta este punto se ha desarrollado el modelo propuesto en esta primera parte de la tesis, se considera para este tema el poder realizar una comparación en lo que respecta a la emisión de contaminantes y al consumo de combustible ya que son dos variables que se toman en cuenta dentro del modelo propuesto. Para lograr lo anterior se realizó una búsqueda de algún otro modelo propuesto con un enfoque un poco diferente al encontrado en la literatura revisada, se encontró que El Banco Mundial (BM) ya había desarrollado un modelo para el cálculo del Costo de Operación Vehicular (COV). Por su parte, en lo que respecta a la emisión de contaminantes se encontró que el software Mobile 6 es una herramienta poderosa para el cálculo de la emisión de contaminantes y al igual que el programa anterior se utilizará como referencia para ver las bondades y defectos que presenta cada uno de ellos con respecto a la metodología propuesta.

3.6 Sistematización

El objetivo final de este capítulo se centra en la sistematización de los cálculos realizados con anterioridad para visualizar conforme varía el tiempo los cambios que sufren las variables durante el recorrido de un vehículo. Para lograr lo anterior se utilizó el lenguaje de programación Java ya que este es un lenguaje de programación orientado a objetos (Los objetos se agrupan en estructuras encapsuladas tanto sus datos como los métodos o funciones que manipulan esos datos) y toma mucha de su sintaxis de C y C++, pero tiene un modelo de objetos más simple y elimina herramientas de bajo nivel, que suelen inducir a errores, como la manipulación directa de punteros o memoria (Gosling *et al.*, 2005). Aprovechando el potencial de programación de Java y de la herramienta de simulación denominada Easy Java Simulations (EJS), creado en Java que ayuda a crear simulaciones interactivas en Java con fines de enseñanza, ha sido creado por Francisco Esquembre como parte del proyecto Open Source Physics (Física de código abierto). Utilizando estas dos potentes aplicaciones se desarrolló el simulador dinámico de un vehículo de dos ejes, cuya simulación al caso carretero

en la figura 3.11 (San Juan del Río-Querétaro) y en el caso urbano mostrado en la figura 3.18 (Ciudad de Querétaro) fueron aplicados para su respectivo análisis.

Hay que resaltar que para poder realizar una corrida, es necesario generar un archivo de texto utilizando los datos generados por el GPS durante el recorrido. Este archivo de texto se interpolará de manera lineal en el simulador y debe de contener la diferencia de la aceleración (m/s^2), de velocidad (m/s), la diferencia de grados (radianes), el radio de curvatura (radianes) y la altitud (metros sobre el nivel del mar) entre los puntos consecutivos tomados por el GPS durante el recorrido. Para este trabajo de tesis se desarrolló una macro en el software TransCAD la cual obtiene los datos leídos por el GPS y realiza los cálculos correspondientes para proporcionar un archivo de texto que servirá de entrada para el simulador. La figura 3.7 muestra el GPS utilizado para el levantamiento de la información. Este GPS es desarrollado por GARMIN Corporation, de la serie 550. El archivo de salida de este GPS es un archivo con extensión gdb o gpx el cual es leído y escrito en un archivo de texto que sirve de entrada para la macro de TransCAD.



Figura 3.7. GPS Garmin Oregon 550.

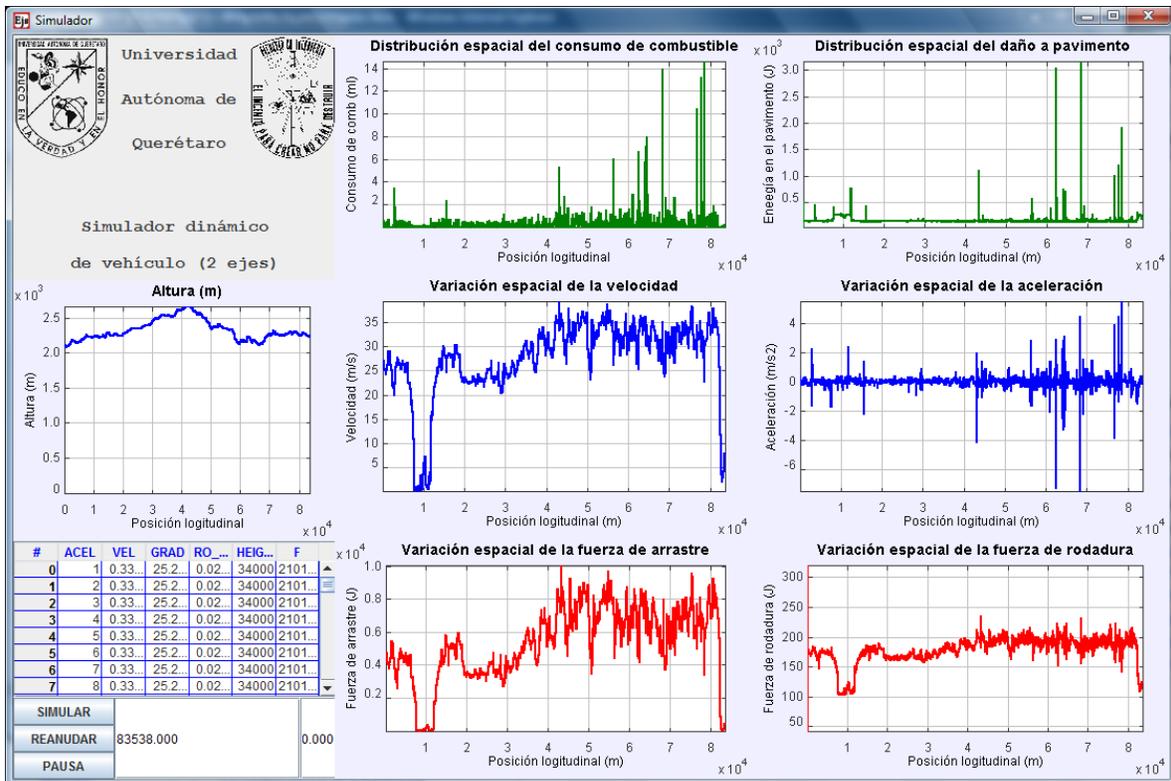


Figura 3.8. Interfaz de usuario del simulador desarrollado durante esta investigación con la herramienta de simulación EJS.

3.6.1 Consola de EJS

La consola de EJS es el punto de partida para ejecutar EJS, es aquí donde se muestran mensajes de salida y posibles mensajes de error de las simulaciones creadas con EJS y, ocasionalmente, mensajes de error del propio EJS.

Tal y como se ve en la figura 3.9, la consola aparece en una ventana separada de la de EJS que no puede cerrarse y cuando la consola arranca se ejecuta una primera copia de EJS.

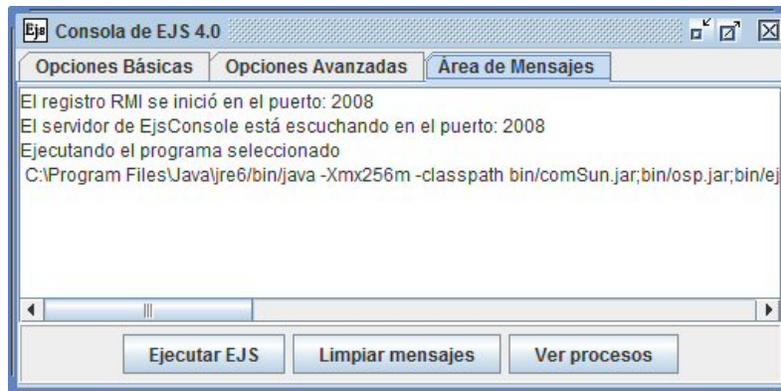


Figura 3.9. Consola de trabajo de EJS.

3.6.2 Interfaz de usuario de EJS

La figura 3.10 muestra la interfaz de usuario de EJS en la cual se muestra una barra de tareas en el lado derecho que proporciona los comando de limpiar, abrir y guardar un fichero, buscar en el código, configurar EJS, mostrar la ayuda, ejecutar una simulación, empaquetar una o más simulaciones en un fichero JAR o exportarlas como applets en páginas web. La parte inferior de la interfaz contiene un área de mensajes donde EJS muestra mensajes de información. La parte central de la interfaz contiene los paneles de trabajo donde se construye la simulación.

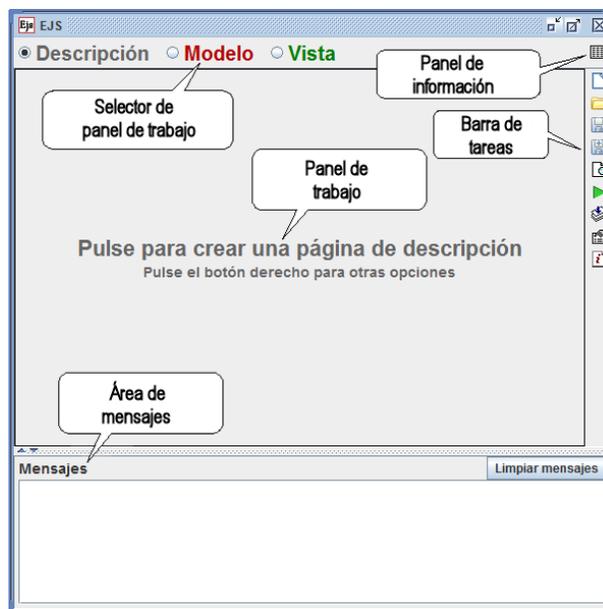


Figura 3.10. Interfaz de programación de EJS.

EJS proporciona tres paneles de trabajo para construir la simulación. Se selecciona el panel de trabajo activo utilizando los botones de radio de la parte superior. El primer panel, Descripción, permite crear y editar narrativa multimedia basada en código HTML que describe la simulación. Cada página de narrativa aparece en una pestaña de este panel de trabajo y el usuario puede editarla o importar ficheros HTML escritos con otro software.

En el segundo panel de trabajo, Modelo, es donde se realiza el proceso de modelado. Este panel se usa para crear variables que describen el modelo de la simulación, para inicializar estas variables, y para escribir algoritmos que describen cómo varían estas variables con el tiempo.

Dentro del panel Modelo se encuentran cinco subpaneles: Variables, Inicialización, Evolución, Relaciones fijas y Propio.

En Variables se declaran tanto las variables como las constantes descritas a lo largo del modelo de forma pública para el lenguaje.

En Inicialización se pueden inicializar las variables con un valor constante o valor inicial o donde se pueden realizar cálculos previos a la simulación.

En Evolución se establece el comportamiento del evento discreto o las Ecuaciones Diferenciales Ordinarias (EDO) para eventos continuos. En este subpanel el sistema se desarrollará de forma autónoma desde el estado actual de las variables hasta el nuevo estado.

En Relaciones fijas se establecen las relaciones de la expresión que se utilizan para calcular el valor de una variable en un momento dado.

En Propio se definen los métodos propios también conocidos como funciones o subrutinas.

En el tercer panel de trabajo, Vista, se encuentran las herramientas para el diseño de la interfaz gráfica de usuario de la simulación, que permitirá a los usuarios finales controlar la simulación y mostrar sus salidas. La interfaz se construye seleccionando elementos de unas paletas y añadiéndolos al denominado Árbol de elementos de la vista.

De la figura 3.12 a la 3.17 se ilustra el dominio espacial de la simulación y los datos GPS para tres diferentes corridas, las cuales se identifican en términos de la velocidad promedio del vehículo como sigue: 21.98 m/s (lento); 25.12 m/s (medio); y 26.98 m/s (rápido). Se debería notar que la corrida lenta representó un tiempo de viaje de 87.86 minutos, mientras que las otras dos 76 y 70.52 minutos para un recorrido medio y rápido respectivamente. Eso es, el correr a prisa representó ciertos ahorros en tiempo, del orden de 13 y 19% con respecto de las corridas media y lenta. Tales ahorros deberían ser evaluados en cierta forma en un esquema de productividad global.

La figura 3.12 ilustra la variación de consumo de combustible con distancia longitudinal para tres corridas consideradas, revelando que la corrida rápida produce picos, seguida de la corrida lenta. La cantidad total de combustible consumido se indica en la figura, con el mínimo consumo de combustible que corresponde a la corrida con velocidad media, mientras el máximo consumo de combustible corresponde a la corrida rápida. Esto es, el estilo de manejo fue un factor determinante en el consumo de combustible, tal y como se esperaba el viaje más rápido causaría un consumo de combustible mayor.

La figura 3.13 describe la distribución espacial del daño al pavimento a lo largo del camino. Estos resultados indican que los picos de daño máximo al pavimento se observan en la corrida más rápida, con la corrida de velocidad media se despliegan menos picos, mientras que el viaje lento causa el mayor daño al pavimento, el que se atribuye a la viscoelasticidad natural del pavimento flexible. Sin embargo, el incremento del daño al pavimento desde 14.26 hasta 17.87 MJ (25%), las velocidades promedio disminuyeron desde 26.98 hasta 21.98 m/s (18%) pero el daño al pavimento incrementó ligeramente desde 14.26 hasta 14.67 MJ (2.8%) cuando la velocidad promedio disminuyó desde 25.12 hasta 21.98 m/s (12.5%). Tales susceptibilidades son atribuidas al estilo de manejo de cada corrida.

Estos fueron los resultados globales para el desempeño del camino y del medio ambiente. Ahora las salidas de las fuerzas cinemáticas y de resistencia se presentan para analizar la variación espacial de estas variables con el fin de

identificar las características cinemáticas que definen el estilo de manejo y finalmente la función de impacto al ambiente y al camino.

La figura 3.14 muestra la variación espacial de la velocidad del vehículo, en la cual los valles observados en los extremos del viaje corresponden a las paradas en las plazas de cobro. Estos resultados indican que la máxima dispersión en términos del máximo hacia los valores mínimos corresponde a una corrida lenta, con la dispersión mínima observada en el caso de la corrida de velocidad media. La figura 3.15 ilustra la variación espacial de la aceleración, donde la corrida más rápida puede ser identificada como la única que representa las variaciones de aceleración más altas mientras que la máxima aceleración se observa en el caso de la corrida lenta (6 m/s^2); la máxima desaceleración se observa en el caso de la corrida más rápida (-7.5 m/s^2). La corrida más rápida representaría de esta manera el estilo de manejo más rudo, implicando mayores variaciones en la velocidad.

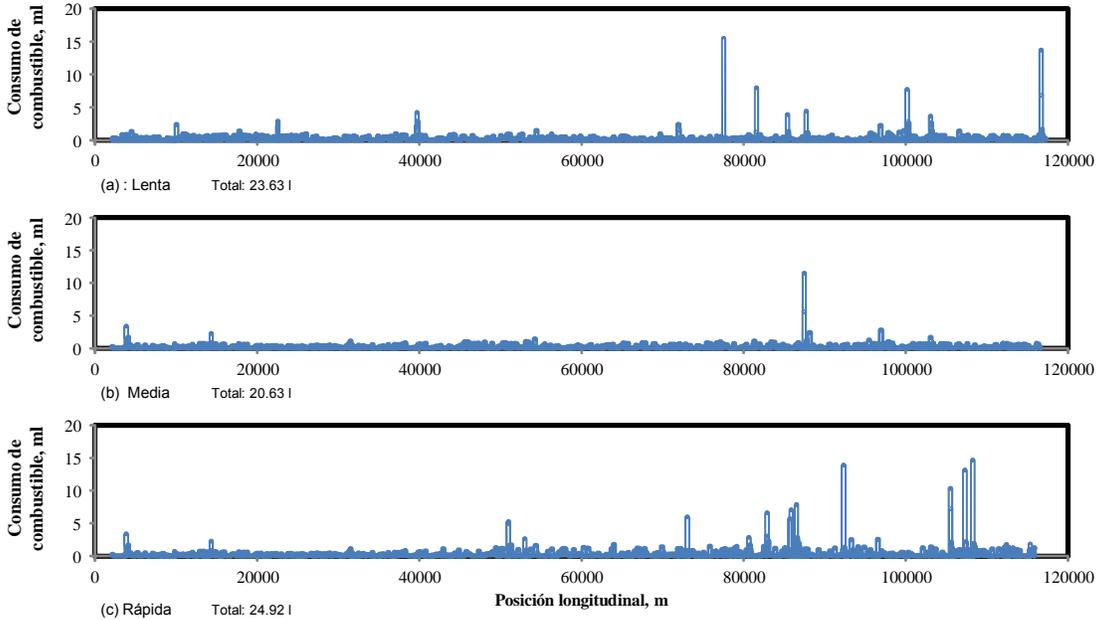


Figura 3.12. Distribución espacial a lo largo de una autopista Mexicana del consumo de combustible calculado.

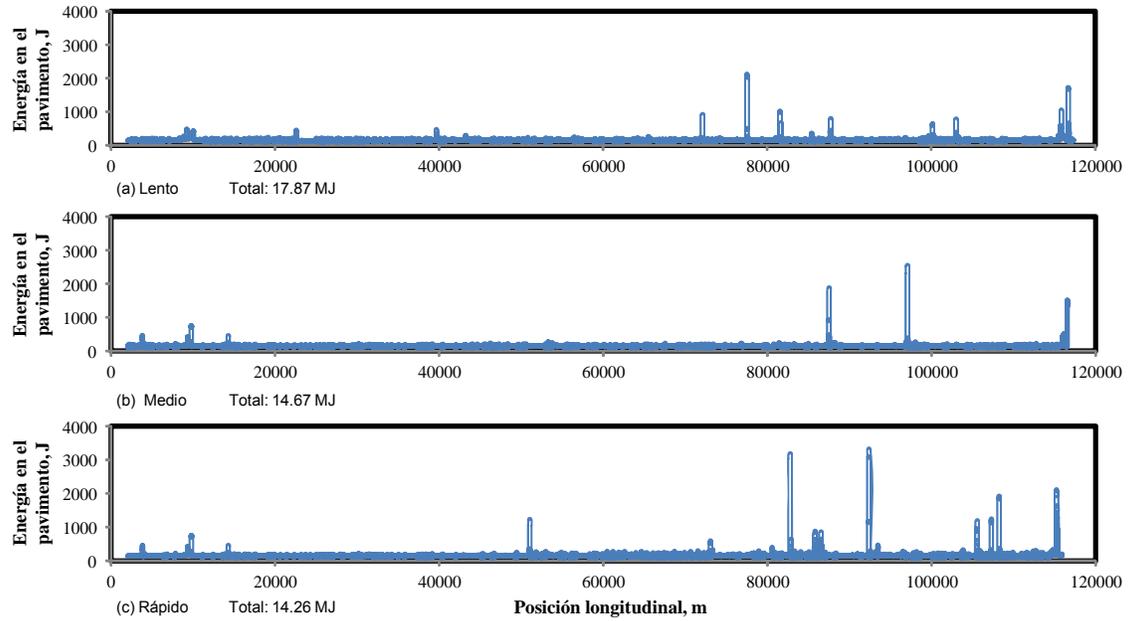


Figura 3.13. Distribución espacial a lo largo de una autopista Mexicana del daño al pavimento simulado.

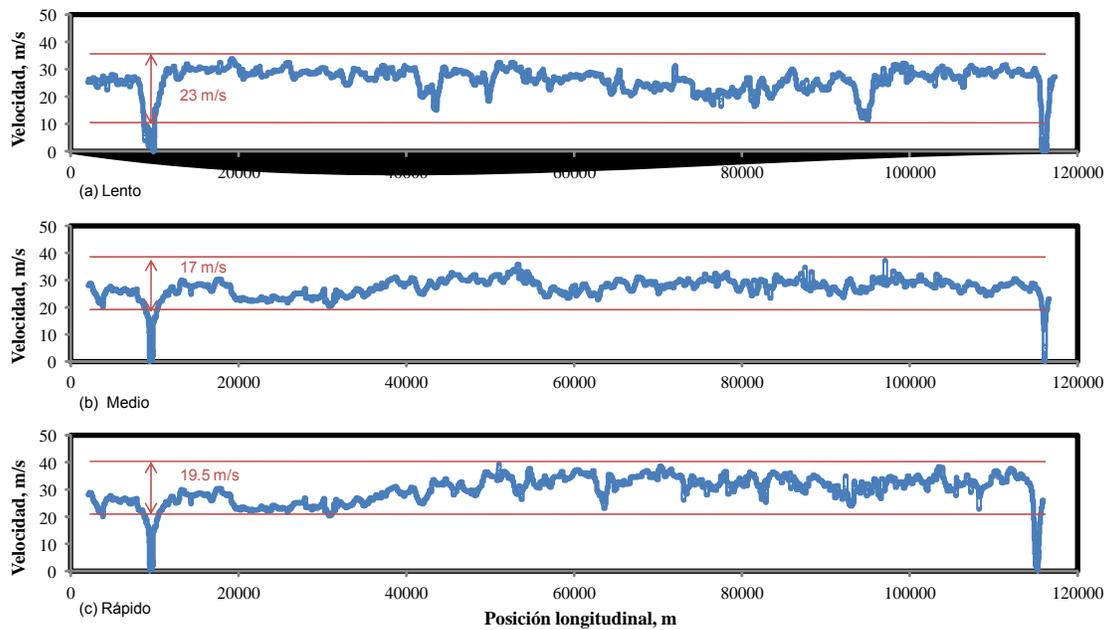


Figura 3.14. Datos GPS de la velocidad a lo largo del camino mexicano.

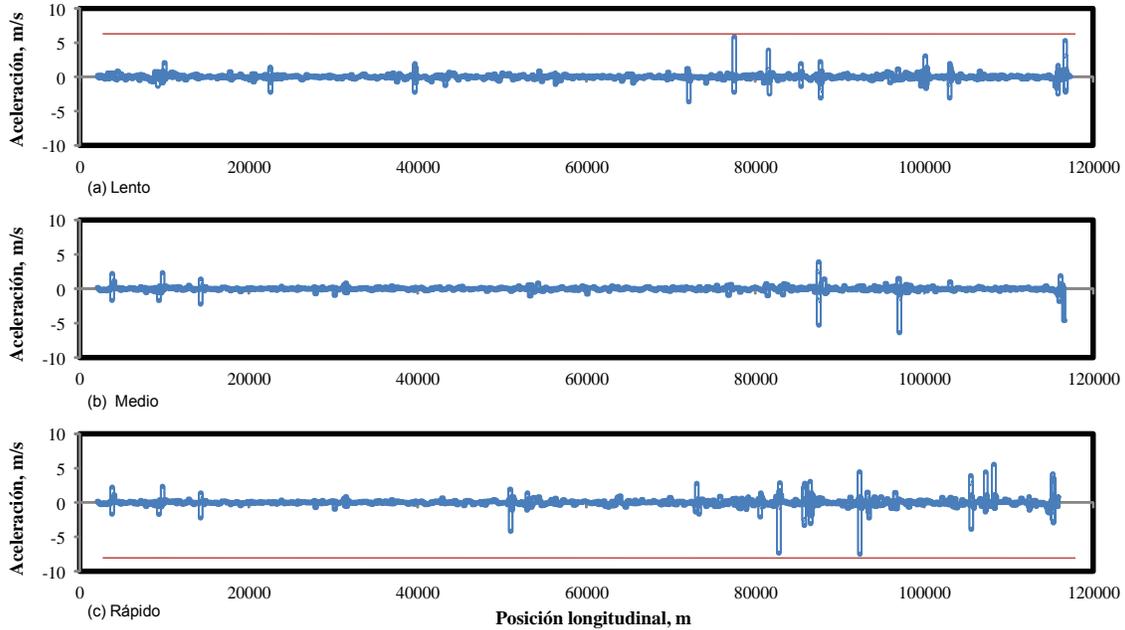


Figura 3.15. Aceleración a lo largo del camino mexicano, calculada a partir de los datos GPS.

La figura 3.16 ilustra la variación espacial de las fuerzas de resistencia del aire, las cuales correlacionan con la variación de la velocidad de la figura 3.14, pero amplificando las variaciones expuestas por la variación espacial de la velocidad. La corrida más rápida representa la máxima fuerza de resistencia (10063 N), seguida por la velocidad media (8961 N) y después por la corrida más lenta (7428 N). La figura 3.17 muestra la variación espacial de las fuerzas de resistencia a la rodadura en las cuales la corrida más rápida exhibe los valores máximos de dispersión (232 N), mientras que la dispersión mínima se observa en el caso de la corrida más lenta (151 N).

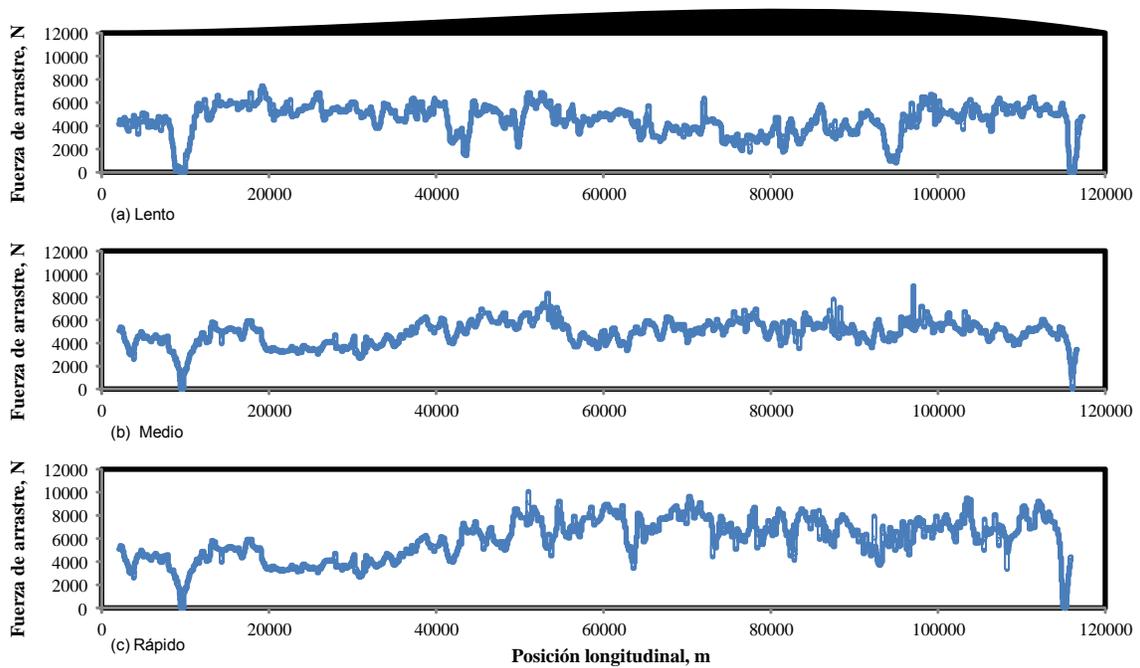


Figura 3.16. Variación espacial de la fuerza de arrastre a lo largo del camino mexicano.

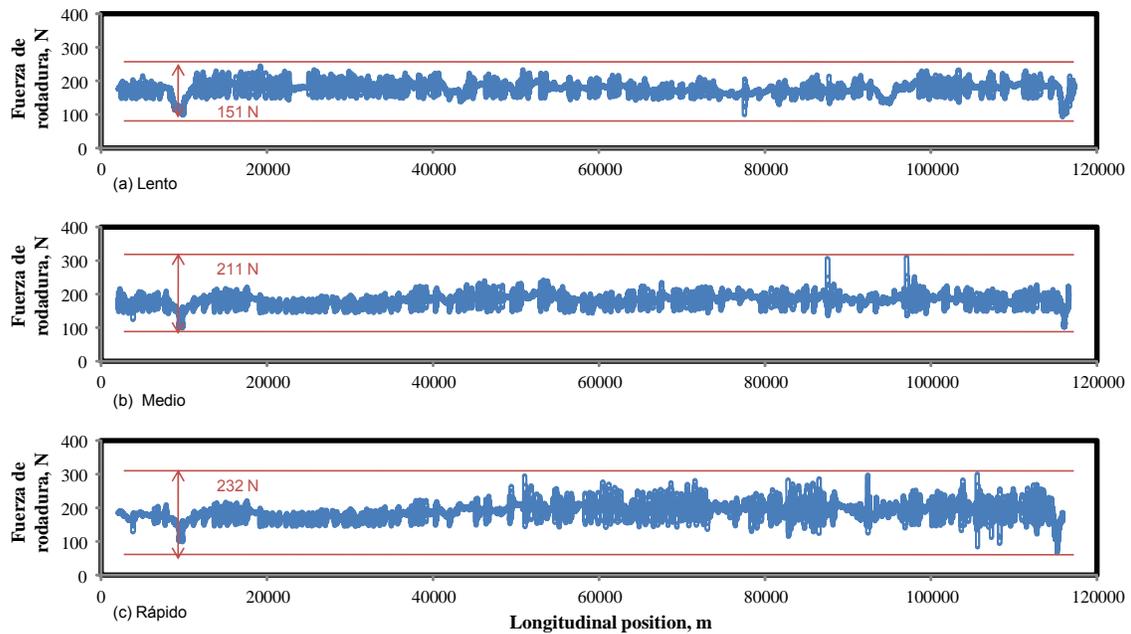


Figura 3.17. Variación espacial, a lo largo de la carretera Mexicana, de la fuerza de resistencia a la rodadura.

Para dar a conocer los factores que describen más cercanamente los estilos de manejo, parte de la figura 3.18 ilustra el efecto de la velocidad sobre la energía en el pavimento y el consumo de combustible. Como era de esperarse, el daño al pavimento decrece con la velocidad promedio de una manera decadente y no lineal. En lo que respecta al consumo de combustible, estos resultados sugieren que la velocidad promedio del vehículo no es una determinante en el consumo de combustible, es decir, el mínimo consumo de combustible se observa en el caso de la velocidad intermedia, no para la velocidad mínima promedio. La figura 3.19 muestra el efecto de la desviación estándar de la aceleración sobre el combustible y el daño al pavimento, favorece el sugerir una correlación entre el consumo de combustible y esta variable. El estilo de manejo podría ser entonces descrito en términos de esta variable estadística, la cual está alineada con lo que se había reportado antes (Hine *et al.*, 2000). De acuerdo a estos resultados, el 35% de aumento en la dispersión de la aceleración índice el 21% de incremento en el consumo de combustible. El daño al pavimento no se correlaciona con la desviación estándar de la aceleración, como se mostró en la figura 3.18 que el daño al pavimento correlaciona inversamente con la velocidad. La figura 3.20 finalmente exhibe el daño al pavimento como una función del consumo de combustible, mostrando un comportamiento altamente no correlacionado.

Finalmente, la corrida realizada con el modelo del BM muestra un consumo de combustible de 19.65 litros en el mismo tramo, un valor cercano a lo reportado por el modelo propuesto sobre carretera, lo que conlleva a reafirmar que el estilo de manejo influye sobre el consumo de combustible ya que el modelo del BM no toma en cuenta el estilo de manejo dadas las condiciones y variables de entrada de dicho modelo.

En esta etapa del estudio se decidió conjuntar el estudio de asignación con el modelo de daño al pavimento y consumo de combustible por ello se decidió realizar un levantamiento dentro de una zona urbana. La zona urbana elegida para el levantamiento y análisis fue la Ciudad de Querétaro.

3.8 Ejemplo de aplicación en zona urbana

Se realizó un recorrido por las vialidades principales (seleccionadas como primarias y secundarias) de la ciudad de Santiago de Querétaro. Esta clasificación de vialidades se muestra en la Tabla 3.2. La figura 3.21 muestra la red vial de Querétaro separada en vialidades primarias y secundarias. Los criterios utilizados para seleccionar las vialidades primarias y secundarias fueron: la velocidad promedio del trayecto (obtenida del GPS), el número de carriles (obtenido del archivo georreferenciado) y el aforo vehicular en el segmento de vialidad. Se utilizó un GPS Garmin Oregon 550 para realizar los recorridos a bordo del vehículo, los 43144 registros generados del GPS fueron exportados a un archivo geográfico y a cada registro se le asignó el identificador del arco recorrido para aplicar la macro de TransCAD y generar cada uno de los archivos a correr en el simulador de pavimento.

Tabla 3.3. Vialidades primarias y secundarias dentro de la zona urbana de Querétaro.

Primarias	Secundaria
5 de Febrero	16 de Septiembre
Av. de la Luz	20 de Noviembre
Autopista México - Querétaro	21 de Marzo
Autopista Querétaro - Celaya	5 de Mayo
Constituyentes	Acceso 1
Ignacio Zaragoza	Angela Peralta
Pie de la Cuesta	Arteaga
Tecnológico	Av. De la Poesía
Av. Universidad	Av. Del Sol
Boulevard Bernardo Quintana	Francisco I Madero
Boulevard Centro Sur	Independencia
Boulevard de la Nacion	José Ma. Pino Suarez
Calzada de los Arcos	Miguel Hidalgo y Costilla
Carretera a Huimilpan	Revolución
Camino a la Cañada	Calzada de Belén
Camino a Tlacote	Camino a San Pedro Martir
Carretera a Chichimequillas	Campo Militar
Carretera Constitución	Carretera a Mompaní
Carretera libre a Celaya	Central de Autobuses
Corregidora	Cerro del Sombrero
Ezequiel Montes	Cimatario
Juarez	Circunvalación
Libramiento Sur-Poniente	Cuauhtemoc
Luis Pasteur	Ejército Republicano
Paseo Constituyentes	Ejido
Prolongación Bernardo Quintana	Epigenio González
Prolongación Corregidora	Hércules
Prolongación Luis Pasteur	Héroe de Nacozari
Prolongación Zaragoza	Ignacio Allende
	Ignacio Manuel Altamirano
	Ignacio Perez
	Invierno
	Candiles
	Manuel Acuña
	Manuel Gutiérrez Nájera
	Mariano Escobedo
	Moisés Solana
	Paseo de Balastradas
	Paseo de la Constitución
	Pathe
	Prolongación Chabacano
	Prolongación Tecnológico Norte
	Regules
	Tlaloc
	Vicente Guerrero

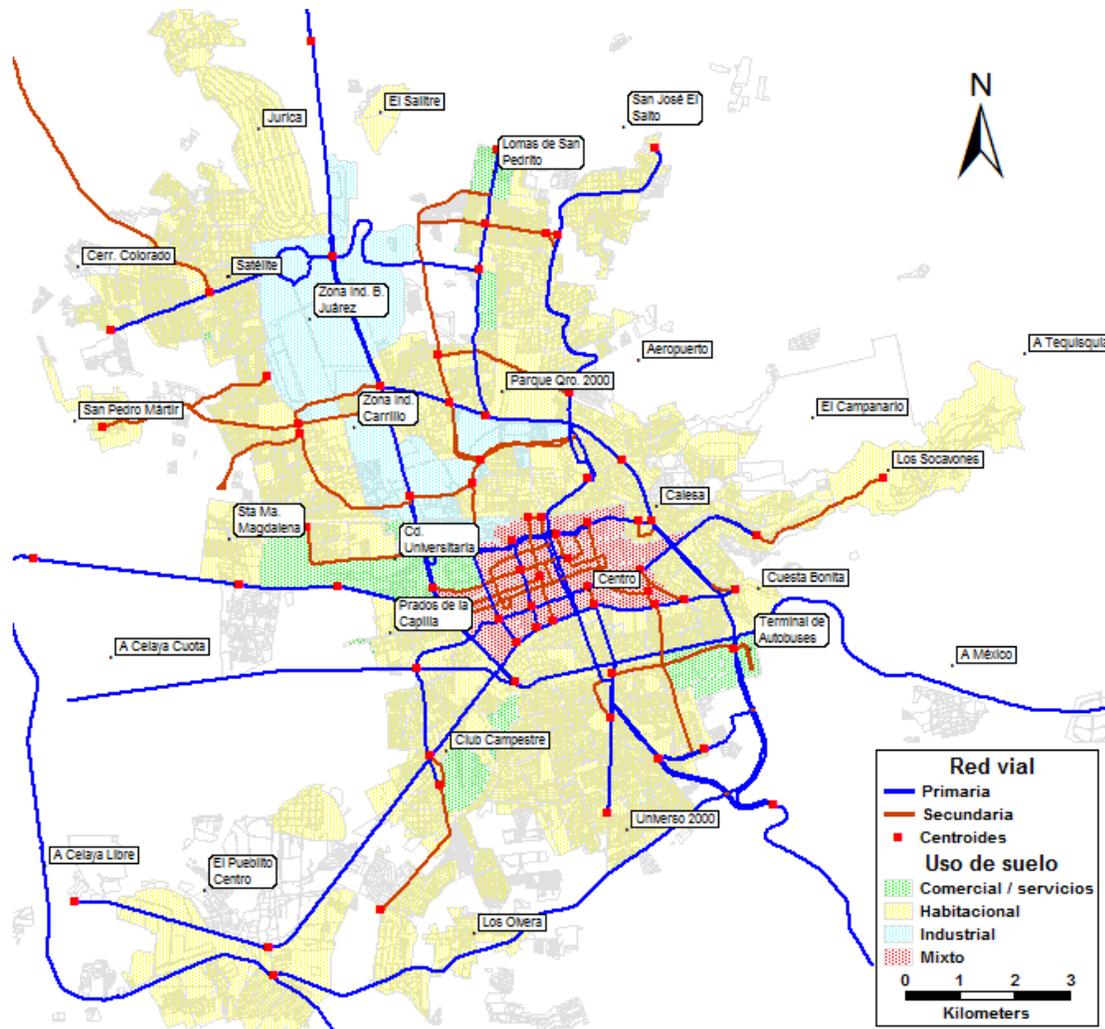


Figura 3.18. Vialidades primarias y secundarias de la red urbana de Querétaro.

Los datos arrojados por el modelo de daño al pavimento muestran que para un solo vehículo, el daño mayor a 600 joules sobre la red se presenta en la red vial primaria con el 68% del daño, el 32% del daño restante se muestra sobre la red vial secundaria. Las 5 vialidades con mayor daño por vehículo se mostraron en orden ascendente en: 1) Carretera a Chichimequillas, 2) Av. Revolución, 3) Campo Militar, 4) Hercules, y 5) Av. de la Luz. Por otro lado, las 5 vialidades reportadas con menor energía acumulada sobre el pavimento fueron: 1) Boulevard Bernardo Quintana, 2) Autopista México-Querétaro, 3) Central de autobuses, 4) Av. del Sol, y 5) Calzada de los Arcos.

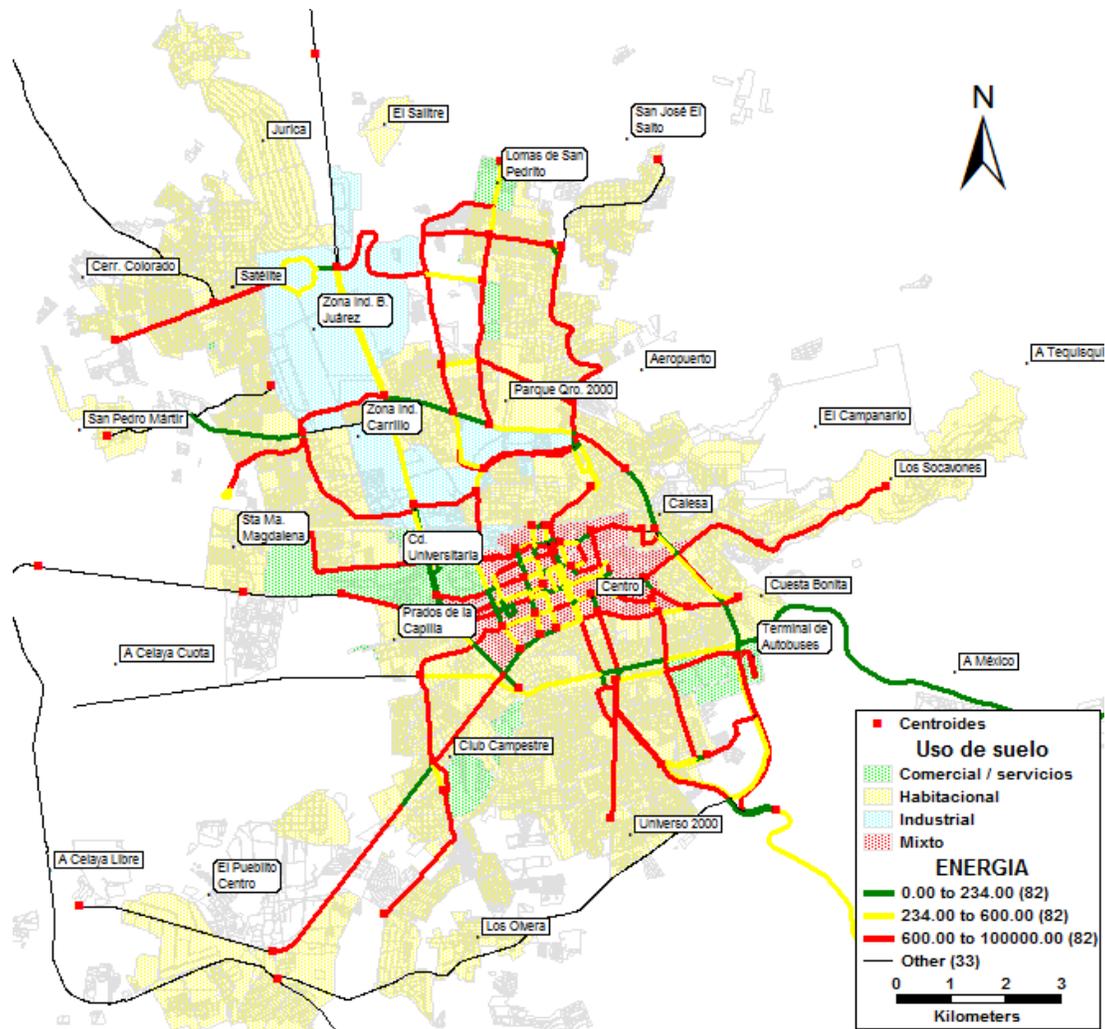


Figura 3.19. Cantidad de energía acumulada en las vialidades de la zona urbana de Querétaro.

De la misma manera se obtuvieron los consumos de combustible por cada vehículo en cada arco de la red urbana de Querétaro. En la figura 3.20 se observa que el consumo de combustible mayor a 0.45 ml por tramo recorrido se da en un 37% en vialidades primarias y en un 63% en vialidades secundarias. De esta manera el mayor consumo de combustible se da en las vialidades: 1) Carretera a Chichimequillas, 2) Carretera a Chichimequillas, 3) Av. Constituyentes, 4) Prolongación Chabacano, y 5) Campo militar; mientras que, los menores consumos de combustible se dan en las avenidas: 1) Av. del Sol, 2) Autopista México-Querétaro, 3) Boulevard Bernardo Quintana, 4) Prolongación Corregidora, y 5) Central de autobuses.

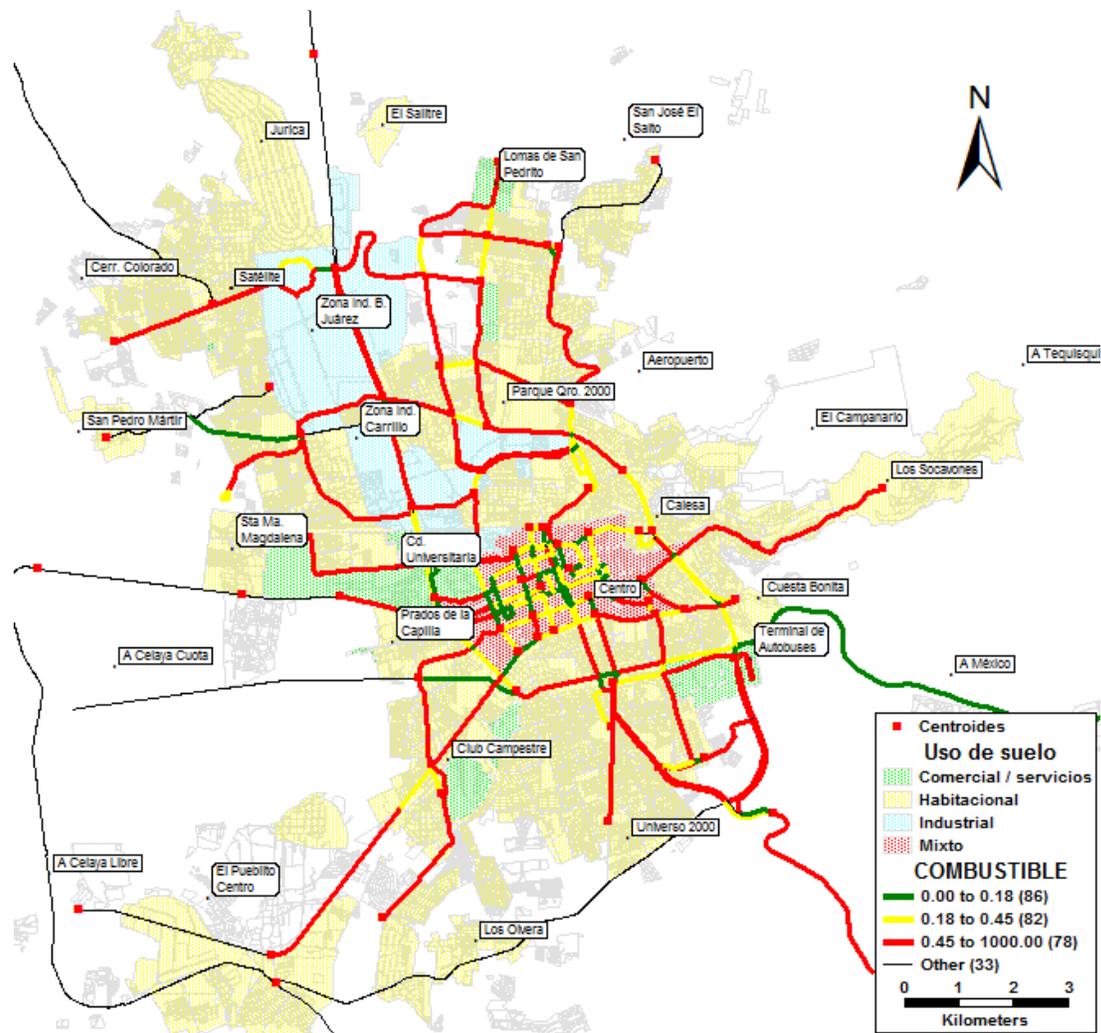


Figura 3.20. Cantidad de combustible consumido en las vialidades de la zona urbana de Querétaro.

Se obtuvo la información de los viajes en la Ciudad de Querétaro, los cuales fueron acomodados para generar la matriz Origen – Destino (OD) y con ellos realizar un modelo de asignación para la distribución de los mismos. El modelo de asignación utilizado fue el del equilibrio del usuario con los parámetros de $\alpha = 0.15$ y $\beta = 4$ y la distribución de los viajes se muestra en la figura 3.21.

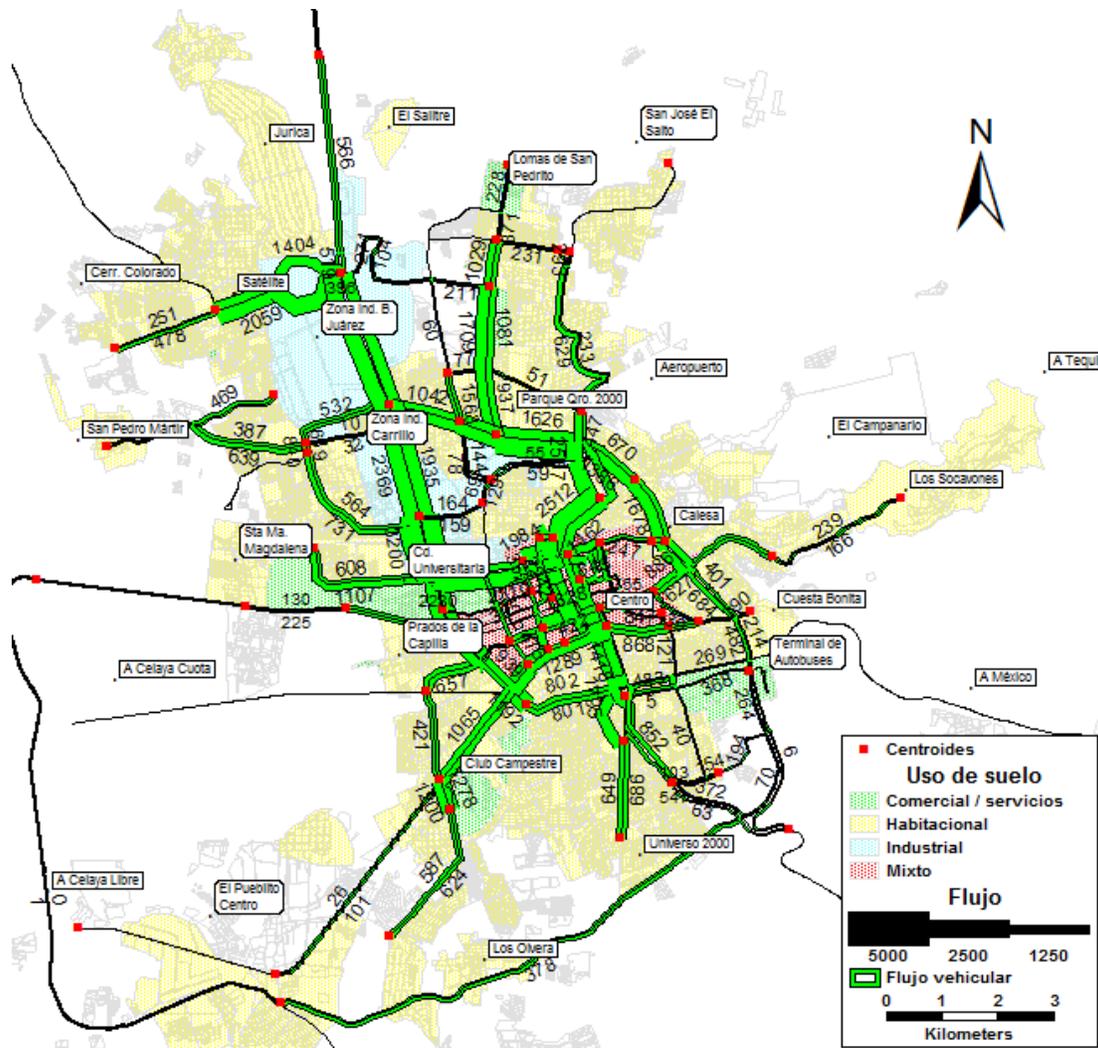


Figura 3.21. Asignación de viajes sobre la Red urbana de Querétaro.

3.8.1 Tarifación del ambiente y del camino

Los resultados sugieren que el comportamiento del conductor afecta fuertemente el camino completo y los efectos ambientales. La combinación de la tarifación al camino y al medio ambiente (CREP) podría estar dado por una expresión simple del siguiente tipo:

$$CREP = \gamma FC + \varphi PD \quad (3.15)$$

Donde γ es el costo unitario del consumo de combustible (FC), y φ es el costo unitario del daño al pavimento (PD).

3.8.2 Discusión

Los resultados sugieren que un seguimiento de cerca y un análisis del comportamiento del conductor son críticos para establecer una medida objetiva del consumo del combustible y del daño al pavimento. Por otro lado, se observa una tendencia opuesta cuando la evaluación del daño al pavimento y al consumo de combustible, es decir un incremento en el consumo de combustible no representa necesariamente un incremento en el daño al pavimento. Sin embargo, bajos consumos de combustible parecen correlacionar con bajos daños al pavimento. Con tales tendencias contradictorias, proponer una medida de desempeño que evalúe de manera integral tanto la tarificación al medio ambiente y al camino conlleva un compromiso, o un intercambio para seleccionar cual es la medida más importante en un determinado momento. Por lo tanto, para evaluar de manera integral un vehículo (de manera ambiental y sobre el camino) ambas medidas de desempeño deben ser tomadas en cuenta, separadamente y después agregadas ambas.

Como las restricciones para las velocidades máximas y mínimas sobre los caminos derivan de la energía y lo concerniente a la seguridad en el camino, un manejo sobre el camino y ambientalmente amigable debe ser considerado el mejor uso del combustible bajo las restricciones existentes de velocidad.

Un modelo ideal para cargar a los usuarios del camino de manera justa y objetiva podría estar basado en simulaciones como aquellas descritas aquí, que evalúan el comportamiento del conductor. Tales funciones podrían estar integradas dentro de dispositivos GPS, los cuales podrían estar a bordo de un vehículo, y la información podría estar lista para ser descargada en plazas de cobro o como una unidad de pos proceso. El ejemplo presentado aquí fue un camión recto de dos ejes, con carga máxima permitida, pero el esquema de cargo debería considerar la configuración particular del camión, incluyendo el tipo de vehículo, su nivel de carga y la distribución de la carga sobre los ejes. Las medidas de desempeño que combinan los datos medidos y los resultados de la simulación ya han sido considerados antes en el sector transporte.

El Índice Internacional de Rugosidad (IRI) por ejemplo, se basa en datos medidos y salidas de simulación (IRI).

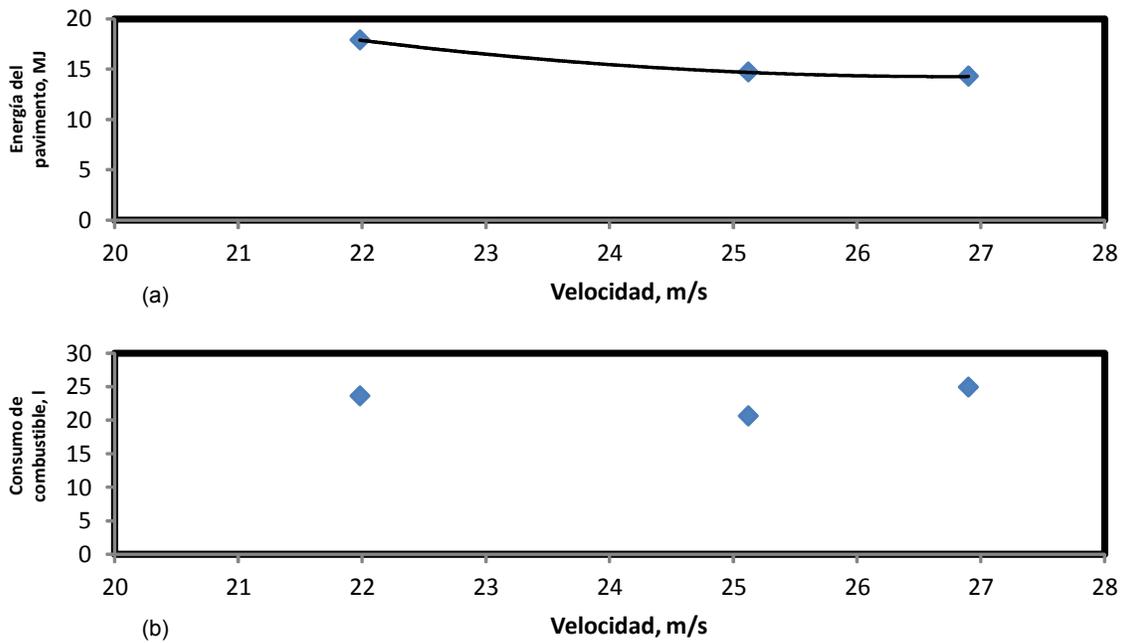


Figura 3.22. Efecto de la velocidad en los parámetros de desempeño. (a) Energía en el pavimento; (b) Consumo de combustible.

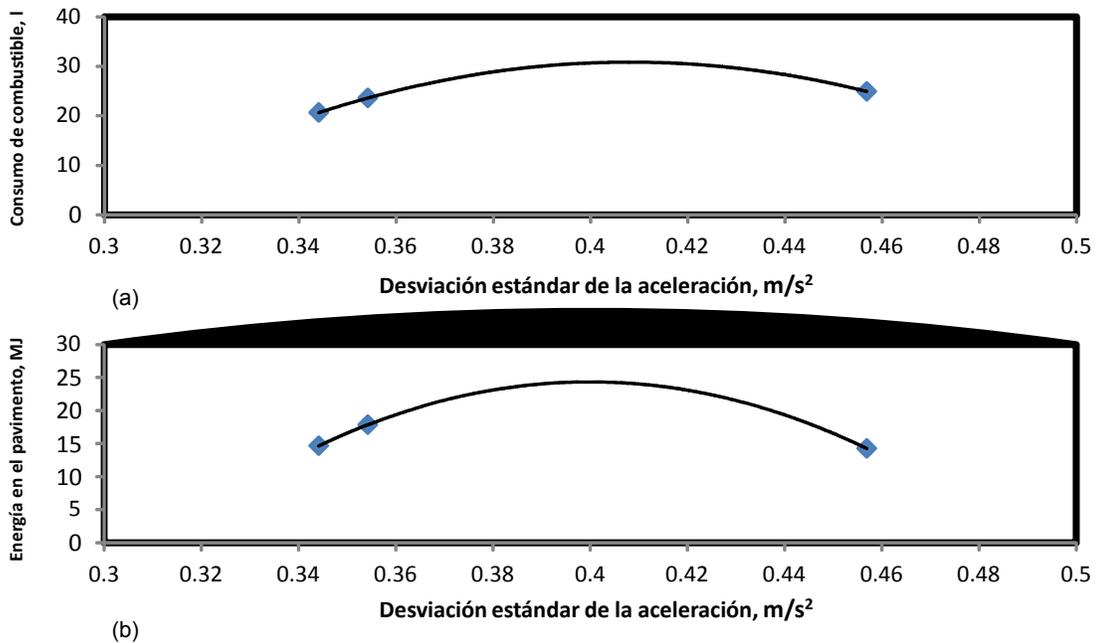


Figura 3.23. Efecto de la desviación estándar de la aceleración en los parámetros de desempeño. (a) Consumo de combustible; (b) Energía en el pavimento.

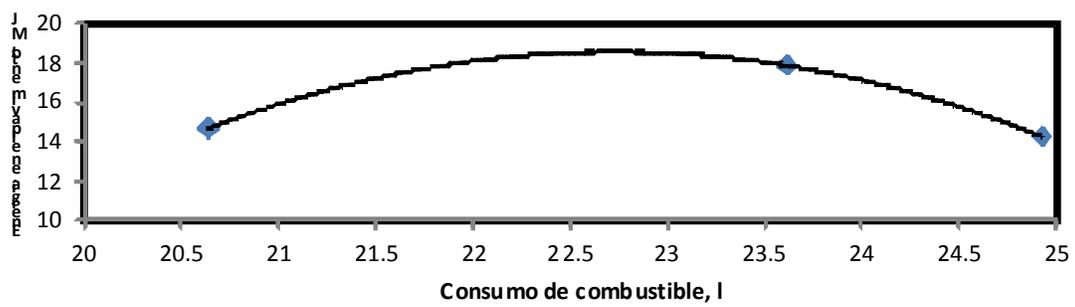


Figura 3.24. Relación entre los parámetros de desempeño.

CAPÍTULO IV. MODELO DE LA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE SENSORES EN UNA RED

En el capítulo de antecedentes se ha concluido que los métodos utilizados para la solución del NSLP son evaluados de manera espacial más que temporal. Por ello en la presente tesis se plantea la solución a este problema tomando en cuenta ambas interrogantes, la espacial y la temporal.

4.1 Descripción del modelo

Como se pudo observar en la revisión de la literatura, uno de los modelos más utilizado para la solución del NSLP es la programación lineal. El modelo se ha descrito, de manera general por varios autores, de la siguiente manera:

$$\text{Max } Z = \sum_{i=1}^n a_i x_i \quad (4.1)$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^{rs} x_i \leq 1 \quad \forall \quad r, s \quad (4.1a)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = k_l \quad (4.1b)$$

$$x_i \leq 1 \quad \forall \quad i \quad (4.1c)$$

$$x_i \geq 0 \quad \forall \quad i \quad (4.1d)$$

Donde:

a_i es el aforo en el arco i ,

x_i es la variable entera que es igual a 1 si el arco i es elegido como sitio de encuesta e igual a 0 si no,

k_l es el número de estaciones de encuesta OD a colocar, y

δ_i^{rs} son los elementos que tienen valor igual a 1 si el par OD rs sería captado por una estación de aforo ubicada en el arco i por formar parte este último del camino más corto entre el par OD rs .

El problema se puede resolver de manera sencilla cuando se tienen redes pequeñas como lo han trabajado Larson (1981), Logie y Hynd (1990), Yang y Zhou (1998), Tamin y Suyuti (2003), Gu y Jia (2005) y Hu *et al.* (2009); pero se comienza a complicar cuando se aplican heurísticas, programación lineal o programación lineal entera para encontrar una solución en redes más complejas ya que la cantidad de variables es grande y el número de ecuaciones de restricción lo es aún más. Una manera de resolver el NSLP es utilizando el software Solver de MS Excel, con el cual se puede encontrar una solución exacta, tratándose de programación lineal entera y sólo cuando el número de estaciones es pequeño, ya que cuando éste va aumentando, se van repitiendo pares OD por lo que la solución entera ya no es viable y se comienza a dar holgura a las repeticiones para encontrar una solución.

4.1.1 Solución con enumeración implícita

Para dar una idea al lector de la importancia de contar con un método eficiente para resolver el problema de localización de sensores se aborda éste mediante enumeración implícita, la cual implica evaluar todas las posibles soluciones del sistema y encontrar la que represente la mejor solución (De la Llata, 1994). Para el caso de la resolución del problema de ubicación de estaciones, el número de operaciones a realizar estaría denotado por la siguiente expresión:

$$NO = C(n, x) \quad (4.2)$$

donde:

NO es el número de operaciones a realizar

C es el número de combinaciones de n estaciones, tomadas x

Partiendo del supuesto de tener una red con 500 arcos y que se pretenden ubicar 8 estaciones en dicha red, el número de operaciones se vuelve muy grande, de tal suerte que a una computadora veloz, con capacidad de un millón de

operaciones de punto flotante por segundo, le llevaría 2944 años llegar a una solución. Esto lleva al absurdo de dar una solución que ya ni siquiera sería requerida. En el caso de las redes urbanas, se tienen cientos o miles de arcos y se requieren de técnicas (como heurísticas o simulación) que si bien no serían capaces de proveer una solución óptima, si pudieran dar una solución cercana a la óptima, en un tiempo razonable.

4.2 Análisis de algoritmos

Hasta este momento se ha estudiado la naturaleza y complejidad del problema de asignación. A través de la revisión de la literatura se ha mostrado que no hay autor que haya resuelto el NSLP utilizando técnicas de optimización global, es por ello que se analizan distintos tipos de algoritmos a utilizar para decidir cuál es el más conveniente para este caso y en su momento la formulación del modelo. Durante la revisión de la bibliografía se encontraron diversas técnicas para la solución de problemas de optimización, como lo son las técnicas clásicas de programación lineal o no lineal o el método Simplex; comprende las ventajas y desventajas de usar las heurísticas; así como, los beneficios de utilizar las estrategias evolutivas.

Las ventajas de utilizar las estrategias evolutivas como herramientas para la resolución de problemas sobre las otras dos técnicas ya mencionadas radican en que estas últimas encuentran soluciones globales, mientras que las otras técnicas sólo encuentran soluciones locales.

Además se describen las diferentes técnicas para llevar a cabo la selección de la población (padres e hijos), las técnicas más utilizadas para el cruzamiento de las poblaciones, de igual manera se describen las técnicas apropiadas para llevar a cabo la mutación. Finalmente, Coello (2007) describe la manera en cómo algunos autores manejan las restricciones en las estrategias evolutivas, siendo de las más comunes las técnicas de penalización.

4.3 La computación evolutiva

Recientemente, algunos problemas de optimización han sido resueltos usando técnicas de búsqueda global como los Algoritmos Evolutivos, tales como: Algoritmos Genéticos (AGs), Estrategias Evolutivas (EE), Programación Evolutiva (PE) o Evolución Diferencial (ED). La estructura de cualquier algoritmo evolutivo es la misma (Eiben y Smith, 2003), es decir, el tipo de selección, el operador de mutación y cruzamiento aplicado para encontrar el valor óptimo de un determinado problema.

En general, se necesitan los cinco componentes básicos siguientes para implementar un AE que resuelva un problema cualquiera (Michalewicz, 1992):

- Una representación de soluciones potenciales al problema.
- Una forma de crear una población inicial de soluciones potenciales (esto se efectúa normalmente de manera aleatoria, pero también pueden usarse métodos determinísticos).
- Una función de evaluación que juega el papel del ambiente, calificando a las soluciones producidas en términos de su “aptitud”.
- Operadores genéticos que alteran la composición de los descendientes (normalmente se usan la cruce y la mutación).
- Valores para los diversos parámetros utilizados por el algoritmo genético (tamaño de la población, probabilidad de cruce y mutación, número máximo de generaciones, etc.).

De las técnicas presentadas en párrafos anteriores se decidió por utilizar la computación evolutiva como herramienta para la solución del NSLP por dos razones: la primera es que no se reporta en la literatura el análisis de este tipo de técnicas para la solución del mismo, la segunda es que es una técnica de búsqueda global y no local como sucede normalmente con las técnicas clásicas de optimización.

4.4 Comentarios

Dada la naturaleza aleatoria de las EE y la diversidad que se puede dar en el tamaño de la población, se puede lograr disminuir el error (encontrando el óptimo global) aunque aumenta el tiempo de cómputo en el cálculo.

Algunos autores consideran que el uso de la combinación de técnicas con algoritmos genéticos (llamados híbridos) puede otorgar muy buenos resultados.

Dada la gran cantidad de información en algunas redes complejas y la gran cantidad de padres e hijos a utilizar para la solución del NSLP, no se podría emplear esta técnica dentro de un sistema en tiempo real.

Como se muestra en el ejemplo de aplicación de la red de Liu, en redes pequeñas los métodos clásicos o las heurísticas brindan una buena aproximación al óptimo por lo que resultan ser eficientes.

4.5 Descripción del modelo

En esta tesis, una de las formas de resolver el problema de la localización de sensores de una red de transporte fue usando una técnica evolutiva, en particular, EE. Esto es, por medio de las EE se determinó el número de estaciones en la red y su ubicación geográfica dentro de ella.

En este caso el NSLP, es planteado como un problema de optimización multiobjetivo (POM), para minimizar la suma de estaciones y la suma del tiempo:

$$\begin{aligned} \min e &= \sum_{ij \in A} y_{ij} \\ \min t &= \sum_{ij \in A} y_{ij} t_{ij} \\ \text{sa} \\ \sum_{ij \in r_k} y_{ij} &\geq 1, \quad \forall r_k, \quad k = 1, \dots, m \end{aligned} \tag{4.3}$$

Donde

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si una estación es localizada en el arco } ij \\ 0, & \text{otro caso} \end{cases},$$

t_i es el tiempo en el arco ij ,
 r_k es el k -ésimo par OD,
 m es el número de pares OD,
 A es el conjunto de arcos en la red.

En la práctica, los problemas multiobjetivo son abordados definiendo una sola función objetivo la cual contiene el POM. Es decir, el POM es transformado en una sola función objetivo con el propósito de hacer el problema de optimización tratable (Eiben y Smith, 2003).

4.5.1 Funciones de Penalización

Son la técnica más común de incorporación de restricciones en la función de aptitud. La idea básica es extender el dominio de la función de aptitud usando:

$$\text{Min } f(x) \pm Q \quad (4.4)$$

donde:

$$Q = c \sum_{j=1}^N g_j(x)^2 \quad (4.5)$$

para todas las restricciones violadas y c es un factor de penalización definido por el usuario.

Hay al menos 3 formas de penalizar a un individuo de acuerdo a su violación de las restricciones (Richardson, 1989):

- Puede penalizársele simplemente por no ser factible, sin usar ninguna información sobre qué tan cerca se encuentra de la región factible.
- Puede usarse la 'cantidad' de infactibilidad de un individuo para determinar su penalización correspondiente.
- Puede usarse el esfuerzo de 'reparar' al individuo (o sea, el costo de hacerlo factible) como parte de la penalización.

Richardson *et al.* (1989) definieron algunas de las reglas básicas para diseñar una función de penalización:

- Las penalizaciones que son funciones de la distancia a la zona factible son mejores que aquellas que son sólo funciones del número de restricciones violadas.
- Para un problema con pocas variables y pocas restricciones, una penalización que sea sólo función del número de restricciones violadas no producirá ninguna solución factible.
- Pueden construirse buenos factores de penalización a partir de 2 factores: el costo de cumplimiento máximo y el costo de cumplimiento esperado. El primero de ellos se refiere al costo de hacer factible a una solución infactible.
- Las penalizaciones deben estar cerca del costo de cumplimiento esperado, pero no deben caer frecuentemente por debajo de él. Entre más preciso sea el factor de penalización, mejores resultarán las soluciones producidas. Cuando una penalización frecuentemente subestime el costo de cumplimiento, el proceso de búsqueda fallara.

4.5.2 Penalización con base en la factibilidad

En este trabajo la penalización es realizada con base en la factibilidad. Esta técnica fue propuesta por Deb (1999) y consiste en evaluar un individuo de acuerdo a:

$$\text{Min } f(x) = \begin{cases} f_k(x) & \text{si la solución es factible} \\ f_{peor} + \sum_{j=1}^N g_j(x) & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4.6)$$

Donde $k \in \{1, 2, \dots, N_p\}$ y f_{peor} es el valor de la función objetivo de la peor solución factible de la población. Si no hay ninguna solución factible en la población, entonces f_{peor} se hace igual a cero.

Deb (1999) usa torneo binario aplicando las siguientes reglas:

- Una solución factible siempre es preferida sobre una no factible.
- Entre 2 soluciones factibles, la que tenga mejor valor de su función objetivo es seleccionada.
- Entre 2 soluciones no factibles, la que viole el menor número de restricciones es elegida.

La representación tradicional usada en AG para codificar un conjunto de soluciones es el esquema binario, es decir, es una cadena formada por ceros y unos (Eiben y Smith, 2003). Para resolver el NSLP dentro de una red de transporte representada a través de una matriz de adyacencia o de una matriz de incidencia de arcos-caminos una serie de valores binarios es usada para representar una solución candidata para el problema; es decir, un vector (p_1, \dots, p_n) donde $p_i \in \{0,1\}$ y n es el número de arcos en la red.

4.5.3 Selección de padres por torneo

Sea N_p el tamaño de la población P . La selección padres es determinista por medio de torneo (Coello, 2007) la cual consiste en:

- Barajar a los individuos de la población.
- Escoger a k individuos de la población y comparándolos con la base en su adaptabilidad (típicamente $k = 2$).
- El individuo más apto es el ganador del “torneo”.
- La población debe barajarse k veces para seleccionar N_p padres.

4.5.4 Cruzamiento en dos puntos

La cruce es un operador que forma un nuevo individuo combinando partes de cada uno de sus padres. Para el caso del NSLP, el tipo de cruzamiento empleado es cruzamiento en dos puntos donde dos padres son empleados para generar un nuevo individuo y los puntos de cruzamiento son elegidos aleatoriamente (Coello, 2007). Sean $p, p' \in P$ y sean $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ puntos de cruzamiento aleatorios, se tiene que los padres

$$p = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n) \quad (4.7)$$

y

$$p' = (p'_1, \dots, p'_{i-1}, p'_i, p'_{i+1}, \dots, p'_{j-1}, p'_j, p'_{j+1}, \dots, p'_n) \quad (4.8)$$

generan los hijos

$$h = (p_1, \dots, p_{i-1}, p_i, p'_{i+1}, \dots, p'_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_n) \quad (4.9)$$

y

$$h' = (p'_1, \dots, p'_{i-1}, p'_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p'_j, p'_{j+1}, \dots, p'_n) \quad (4.10)$$

4.5.5 Mutación por intercambio recíproco

Se seleccionan aleatoriamente dos posiciones del individuo y se intercambian los valores. Dados $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$, sin pérdida de generalidad, supóngase $i < j$. El individuo $p = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_j, p_{j+1}, \dots, p_{n-1}, p_n)$ es cambiado por el individuo mutado $p' = (p_1, p_2, \dots, p_{i-1}, p_j, p_{i+1}, \dots, p_{j-1}, p_i, p_{j+1}, \dots, p_{n-1}, p_n)$

4.5.6 Selección de supervivencia

La selección de supervivencia usada es el reemplazo basado en la edad, es decir, en cada generación los padres son reemplazados por hijos quienes, ahora, representan la población actual.

4.6 Análisis de la red

Para el desarrollo de este capítulo se desarrollaron distintas metodologías para aplicarlas sobre una red teórica y poder comparar los resultados obtenidos con heurísticas, con técnicas clásicas de optimización y con EE. Las metodologías seleccionadas fueron: la resolución mediante Solver, la heurística desarrollada por Hodgson (1990), la heurística de Ignizio descrita por De la Llata (1990), la metodología aplicada por Hu *et al.* (2009) y el modelo propuesto con EE. La red utilizada en esta tesis es la red urbana de Querétaro, la cual se muestra en la figura 4.21 y sobre la cual se calcularon otros factores así como, el algoritmo propuesto.

Se estimaron varios indicadores de la red: Para determinar la variabilidad los indicadores de la red. Se calculó el Índice Beta de Kansky el cual expresa la relación entre los arcos y nodos de un grafo midiendo la conectividad de la red (Potrikowsky y Taylor, 1984), se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\beta = \frac{a}{n} \quad (4.11)$$

Donde:

β es el índice Beta,

a es el número de arcos en la red, y

n es el número de nodos en la red

Se calculó el Índice Gamma el cual relaciona el número de arcos existentes y el número máximo que puede existir dentro de un grafo determinado tomando en cuenta la cantidad de nodos en una red. El valor oscila entre 0 y 1, 0 cuando los nodos no están conectados y 1 para un grafo completamente conectado (Bosque, 1992).

$$\gamma = \frac{a}{\frac{n*(n-1)}{2}} \quad (4.12)$$

Donde:

γ es el índice Gamma,

a es el número de arcos en la red, y

n es el número de nodos en la red

Se definió el índice de Shimbel, sumando los valores de cada fila de la matriz de accesibilidad topológica el cual muestra la cantidad de arcos a atravesar para ir de un nodo a todos los demás del grafo (Garrido, 1995).

$$A_y = \sum d_{xy} \quad (4.13)$$

Donde:

A_y es el Índice de Shimbel, y

d_{xy} es el número de arcos que separa los nodos x e y por el camino más corto

Se calculó además la longitud media de la vía dividiendo el índice de Shimbel entre el número de nodos o con la siguiente expresión (Garrido, 1995):

$$F_y = \frac{A_y}{n} \quad (4.14)$$

Donde:

F_y es la longitud media de la vía,

A_y es el índice de Shimbel, y

n es el número de nodos en la red

Se calculó el índice de accesibilidad topológica relativa con la siguiente expresión (Garrido, 1995):

$$\Omega_g = \frac{(A_y - A_{\min})}{(A_{\max} - A_{\min})} * 100 \quad (4.15)$$

Donde:

Ω_g es el índice de accesibilidad topológica relativa,

A_y es el índice de Shimbel del nodo evaluado,

A_{\min} es el índice de Shimbel de valor más bajo, y

A_{max} es el índice de Shimbél de valor más alto

Se calculó el índice de dispersión para medir la accesibilidad conjunta del grafo (Bosque, 1992) medida con la siguiente expresión:

$$G = \sum_{y=1}^n A_y \quad (4.16)$$

Donde:

G es el índice de dispersión, y

A_y es el índice de Shimbél del nodo evaluado

Finalmente se calculó el índice de centralidad media que busca reconocer la posición topológica de los nodos dentro del grafo para establecer su influencia sobre el área circundante (Garrido, 1995):

$$C = \frac{A_y}{(n-1)} \quad (4.17)$$

Donde:

C es el índice de centralidad media,

A_y es el índice de Shimbél del nodo evaluado, y

n es el número de nodos en la red.

4.7 Resultados

Aplicando programación lineal el tiempo de formulación de restricciones para el problema consume demasiado tiempo por lo que se decidió no enterar para resolver con Solver, se tiene que la función objetivo tiene un total de 279 variables y 5852 restricciones además se tomaron en cuenta las 279 restricciones de no negatividad para cada variable. Después de correr el modelo en MS Excel, se obtuvieron las siguientes localizaciones de sensores:

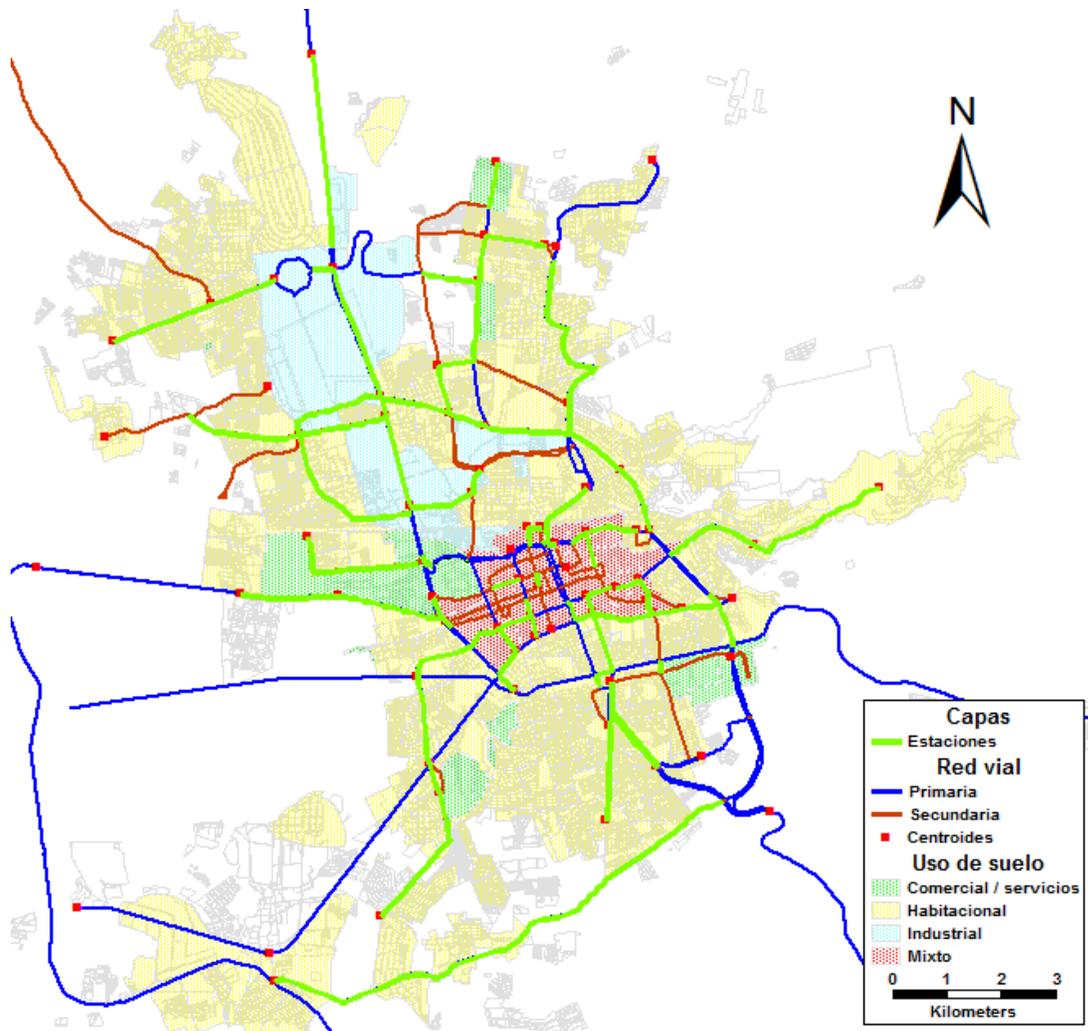


Figura 4.1 Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando programación lineal entera.

Aplicando la heurística de Hodgson (1990), se obtuvieron 85 sensores ubicados en la red, la ubicación de los sensores se muestra en la figura 4.2. Con la aplicación de esta técnica y por el tamaño de la red, se llega a una solución óptima dentro de un periodo muy corto. A pesar de que la solución no es la óptima ni de que arroje resultados esperados en cuanto al número de las estaciones deseadas (por ejemplo 10 o 15 sensores) resulta ser de gran utilidad para el momento de la planeación y la toma de decisiones con respecto a cuales podrían ser las ubicaciones más convenientes.

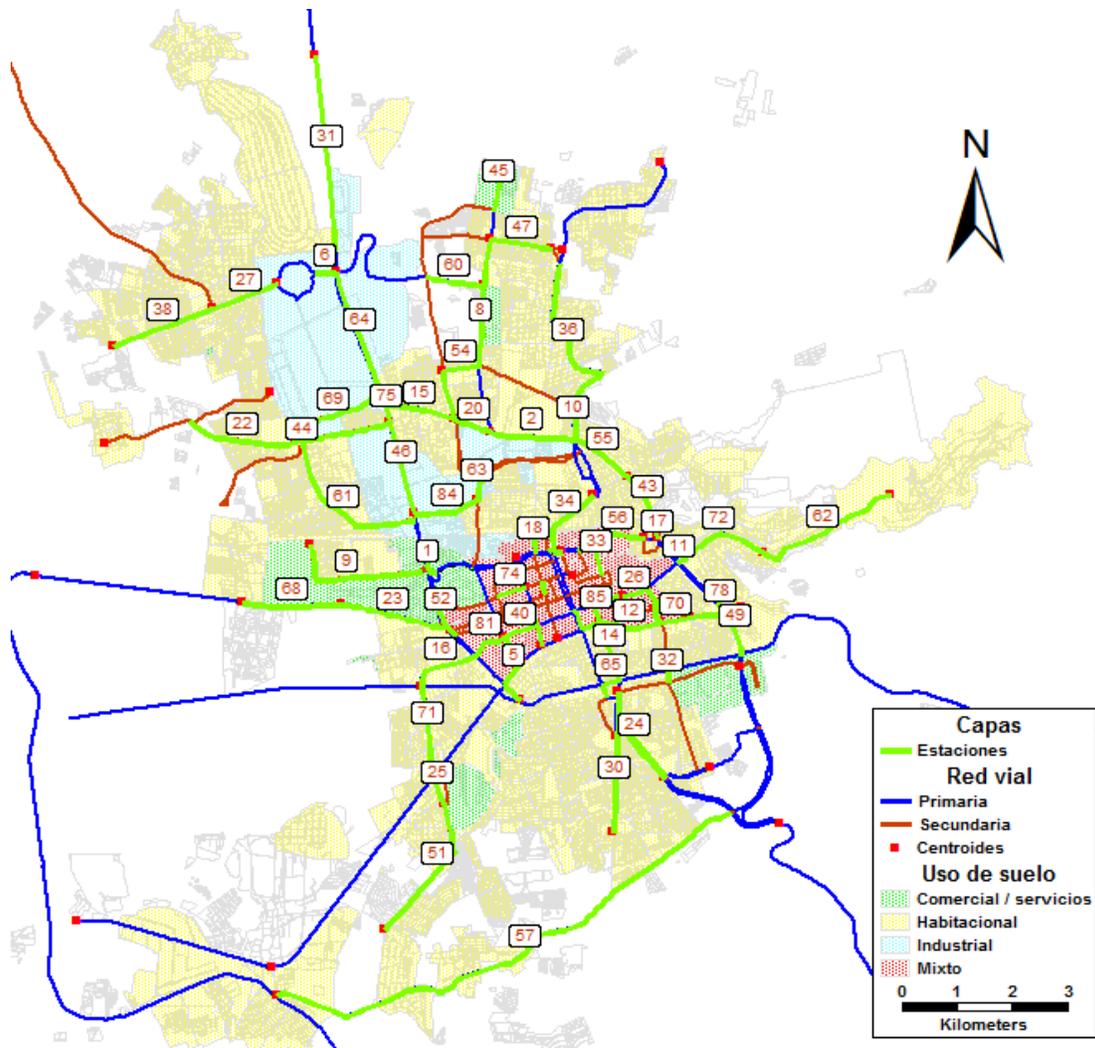


Figura 4.2 Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando la heurística de Hodgson.

Se utilizó la técnica de Ignizio descrita por De la Lata (1990), en la cual la localización de los sensores se da exactamente igual que en la metodología desarrollada por Hodgson (1990), tal como lo muestra la figura 5.4. La diferencia es en el tiempo del cálculo, ya que la técnica de Ignizio tarda más.

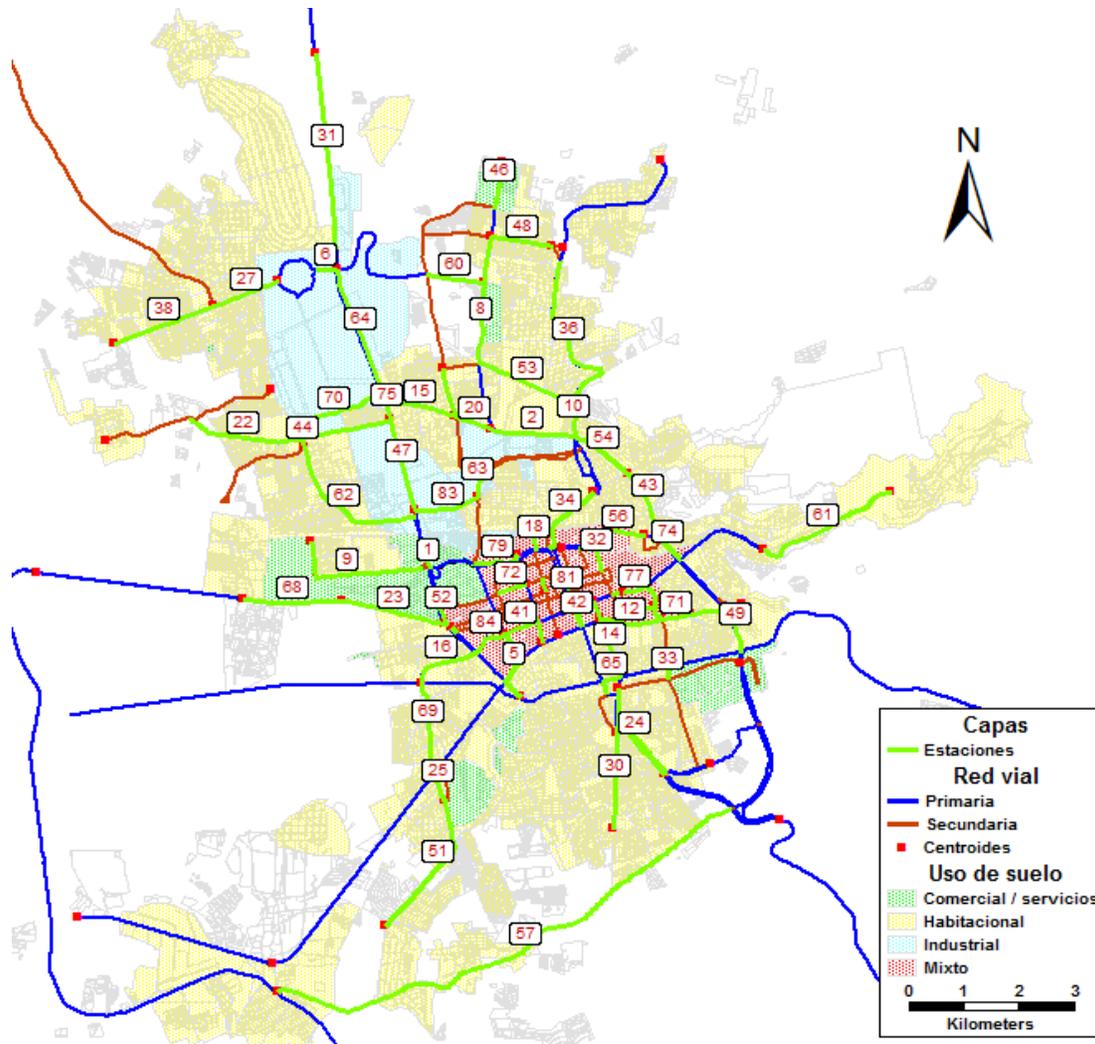


Figura 4.3 Ubicación de sensores sobre la red urbana de Querétaro, utilizando la heurística de Ignizio aplicada por De la Llata (1990).

La metodología de Hu *et al.* (2009), es la técnica que analiza tanto la topología de la red como las posibles distribuciones de los pares OD dentro de la misma. Dentro de esta metodología se encontró el inconveniente de que el autor toma en cuenta todos los caminos posibles entre los pares OD, lo cual dificulta la aplicación de esta metodología dentro de la red de Liu por la gran cantidad de caminos que se pueden encontrar.

Si se toma la matriz de adyacencia de la red de Liu, se tiene una matriz de 63x63. Al elevar esta matriz al cuadrado se obtiene el total de viaje con una longitud igual a 2, al elevarlo al cubo, se obtiene el total de caminos con longitud igual a 3, al elevarlo a la cuarta potencia, se obtiene el total de caminos de longitud 4 entre cada par OD, y así sucesivamente (Johnsonbaugh, 2005).

Para la metodología de Hu *et al.* (2009) se necesita tener el total de caminos entre todos los pares OD, el problema se complica dado que es una red bidireccional, contiene un número relativamente grande de nodos por tanto la cantidad de caminos posibles entre los centroides se vuelve tan grande como se quiera, es decir una matriz de adyacencia elevada a una potencia x dará una cantidad grande de combinaciones de rutas. Para resolver este problema sólo se tomó la ruta más corta entre los pares OD, sobre esta matriz (de arcos-caminos) obtenida, se aplicó la forma escalonada reducida para identificar los arcos base (Friedberg *et al.*, 2003).

Como se puede observar en la figura 4.4, la metodología de Hu *et al.* dista de la solución planteada utilizando programación lineal entera o una heurística. Además de que esta metodología sólo muestra los lugares más convenientes para la localización de los sensores, no muestra el orden de importancia.

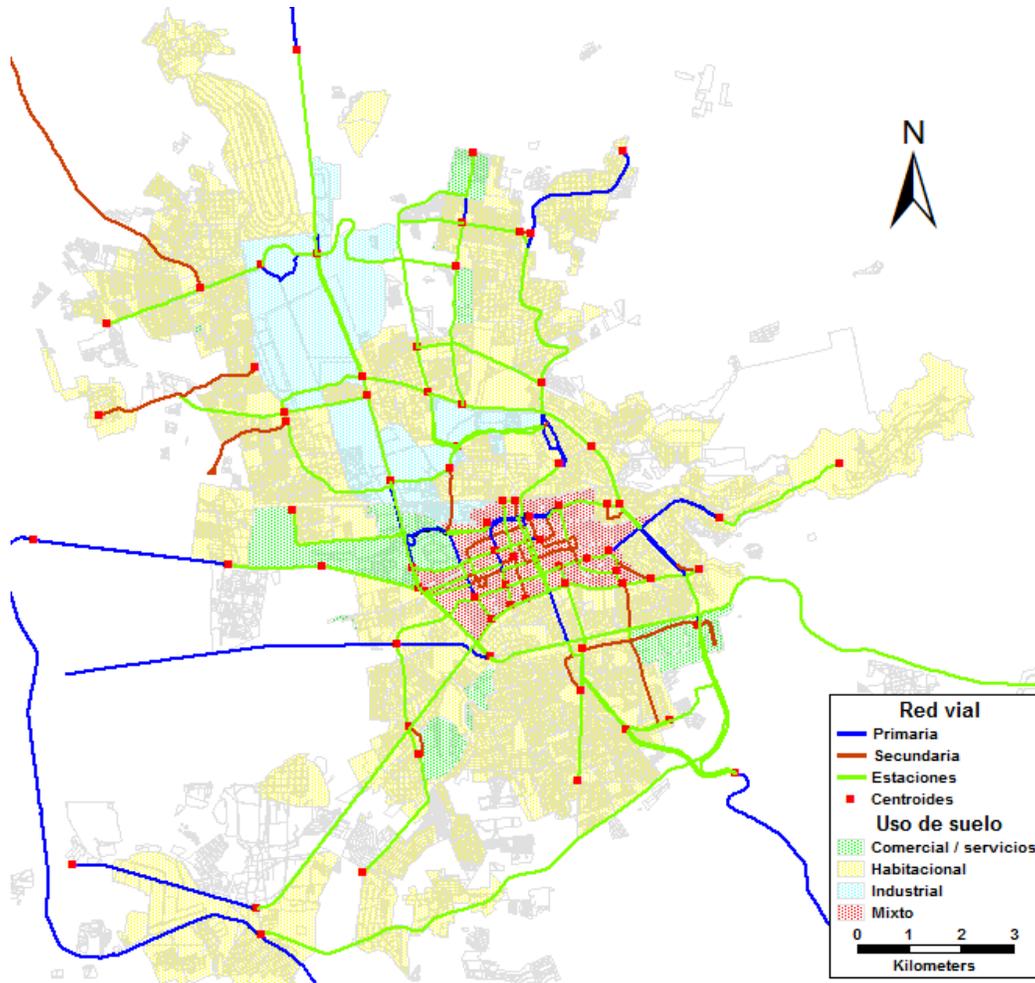


Figura 4.4 Ubicación de sensores sobre la red de Querétaro, utilizando la metodología de Hu *et al.* (2009).

Dentro de las EE se utilizó un modelo de asignación en redes que toma en cuenta el congestionamiento dentro de una red, este fue el de “Equilibrio del Usuario”. Una vez realizada la asignación, se obtuvieron los flujos asignados, en una matriz, se obtuvo la matriz de adyacencia y aplicando el modelo descrito en la ecuación 4.3. Algunos autores recomiendan hacer varias corridas para observar el comportamiento del algoritmo por lo que se decidió realizar 10 corridas, los resultados se muestran en la tabla 4.1

Tabla 4.1: Corridas realizadas para resolver el NSLP utilizando EE

NO. CORRIDA	NO. ESTACIONES	TIEMPO	FLUJO	PARES OD CUBIERTOS
1	149	115.5981	98275	5852
2	145	115.1274	96380	5852
3	142	114.2199	93164	5852
4	145	111.7665	94549	5852
5	146	115.8206	96456	5852
6	145	111.036	99467	5852
7	140	113.3506	96177	5852
8	148	114.5434	96040	5852
9	152	116.5867	102439	5852
10	156	116.0973	106792	5852

De la tabla 4.1 se puede observar que en la corrida número 7 fue donde se obtuvo la mayor cantidad de pares con el menor número de estaciones. Cabe aclarar, como ya se mencionó antes, el número de estaciones es mayor que con las heurísticas y con la programación lineal ya que en esta metodología utilizada si se toma en cuenta el congestionamiento y en las otras técnicas, dada su naturaleza, no sería sencillo involucrar el concepto de congestionamiento en la heurística utilizada. A pesar de que el tiempo que tarda en encontrar la solución óptima es mayor que en las otras metodologías, se considera dentro del rango aceptable para resolver problemas reales y entregar resultados por lo que se consideró como la mejor herramienta para la localización de sensores dada su naturaleza de búsqueda global. Cabe aclarar que ya que consume bastante memoria RAM, se debe de limitar a redes menores a 500 arcos y con alrededor de 100 centroides para que el algoritmo pueda correr en MATLAB.

Los resultados se resumen de la tabla 4.2 a la tabla 4.5. Todas las corridas se realizaron en una laptop con procesador Intel Centrino Duo con velocidad de 2GHz, memoria RAM de 2GB y sistema operativo Windows Vista de 32 bits. La tabla 4.2 muestra el tiempo que se tardó en realizar el proceso previo al cálculo de la localización de los sensores, mientras que la tabla 4.3 muestra el tiempo que se tardó el cálculo de cada una de las técnicas utilizadas para resolver el NSLP. La tabla 4.4 indica el tiempo invertido en interpretar los resultados. Finalmente se muestra en la tabla 4.5 el tiempo total transcurrido para obtener la solución del NSLP desde las operaciones previas al cálculo, como las operaciones para la interpretación de los datos.

Tabla 4.2: Tiempo de cálculo de los procesos realizados antes de resolver el NSLP utilizando diferentes técnicas

Metodología	pre proceso	tiempo de cálculo (min)
Solver	Verificar continuidad de la red. Generar matrices OD. Correr macro de TransCAD, la cual elabora la matriz de arcos-caminos (con unos y ceros)	135
Hodgson	Verificar continuidad de la red. Generar matrices OD	100
Ignizio	Verificar continuidad de la red. Generar matrices OD	100
Hu	Verificar continuidad de la red. Correr macro de TransCAD, la cual elabora la matriz de arcos-caminos (con unos y ceros)	120
EE	Verificar continuidad de la red. Generar matrices OD. Correr macro de TransCAD, la cual obtiene la información de la red a evaluar, con ella elabora la matriz de adyacencia, después obtiene la matriz de tiempos de viaje entre nodos y finalmente se realiza el modelo de asignación para obtener la repartición de flujos entre centroides	110

Tabla 4.3: Tiempo de cálculo de los procesos utilizados para resolver el NSLP en cada una de las diferentes técnicas utilizadas.

Metodología	Proceso	tiempo de cálculo (min)
Solver	Leer el archivo de texto en MS Excel. Introducir ecuaciones de no negatividad. Introducir función objetivo. Introducir restricciones. Resolver el modelo mediante Solver	550
Hodgson	Correr la macro desarrollada en TransCAD	10
Ignizio	Correr la macro desarrollada en TransCAD	55
Hu	Introducir la matriz de arcos caminos en Matlab y resolver el sistema utilizando Gauss-Jordan	25
EE	Correr el código desarrollado en Matlab el cual busca la ubicación óptima de los sensores, a través del uso de Estrategias Evolutivas, utilizando las matrices de adyacencia, tiempos y flujo	180

Tabla 4.4: Tiempo de cálculo de los procesos realizados posteriormente a la solución del NSLP en cada una de las técnicas aplicadas.

Metodología	pos proceso	tiempo de cálculo (min)
Solver	Obtener los arcos seleccionados como estaciones e interpretarlos en la red de TransCAD	10
Hodgson	lo realiza la macro programada en TransCAD	0
Ignizio	lo realiza la macro programada en TransCAD	0
Hu	Interpretar los resultados de los arcos linealmente independientes e interpretarlos en la red de TransCAD	10
EE	Obtener los arcos seleccionados como estaciones e interpretarlos en la red de TransCAD	5

Tabla 4.5: Tiempo total del proceso para resolver el NSLP utilizando diferentes técnicas.

Metodología	tiempo total (min)	Resultado obtenido
Solver	695	Óptimo local
Hodgson	110	Óptimo local
Ignizio	155	Óptimo local
Hu	155	Región factible de localización de sensores
EE	295	Óptimo global

Finalmente, para establecer la relación existente entre los indicadores topológicos de la red y la localización de los sensores se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 4.6. El índice Beta fue de 1.5, el índice gamma fue de 0.073171, el índice de dispersión igual a 332 y la accesibilidad media fue de 7.904762.

Tabla 4.6: Indicadores topológicos encontrados en la red urbana de Querétaro.

Nodo No.	Índice de Shimbel	Longitud media de la vía	Accesibilidad topológica relativa
1	16	0.088398	37.5
2	18	0.099448	62.5
3	19	0.104972	75
4	20	0.110497	87.5
5	19	0.104972	75
6	14	0.077348	12.5
7	17	0.093923	50
8	19	0.104972	75
9	18	0.099448	62.5
10	14	0.077348	12.5
11	20	0.110497	87.5
12	21	0.116022	100
13	19	0.104972	75
14	19	0.104972	75
15	17	0.093923	50
16	15	0.082873	25
17	16	0.088398	37.5
18	17	0.093923	50
19	16	0.088398	37.5
20	14	0.077348	12.5
21	13	0.071823	0
22	15	0.082873	25
23	16	0.088398	37.5
24	15	0.082873	25
25	19	0.104972	75
26	15	0.082873	25
27	17	0.093923	50
28	16	0.088398	37.5

Nodo No.	Índice de Shimbel	Longitud media de la vía	Accesibilidad topológica relativa
29	16	0.088398	37.5
30	14	0.077348	12.5
31	16	0.088398	37.5
32	20	0.110497	87.5
33	18	0.099448	62.5
34	16	0.088398	37.5
35	18	0.099448	62.5
36	18	0.099448	62.5
37	14	0.077348	12.5
38	16	0.088398	37.5
39	15	0.082873	25
40	18	0.099448	62.5
41	18	0.099448	62.5
42	15	0.082873	25
43	19	0.104972	75
44	18	0.099448	62.5
45	19	0.104972	75
46	19	0.104972	75
47	19	0.104972	75
48	18	0.099448	62.5
49	20	0.110497	87.5
50	18	0.099448	62.5
51	15	0.082873	25
52	14	0.077348	12.5
53	14	0.077348	12.5
54	13	0.071823	0
55	14	0.077348	12.5
56	16	0.088398	37.5
57	15	0.082873	25
58	15	0.082873	25
59	16	0.088398	37.5
60	19	0.104972	75
61	14	0.077348	12.5
62	16	0.088398	37.5
63	19	0.104972	75
64	17	0.093923	50
65	18	0.099448	62.5
66	15	0.082873	25
67	16	0.088398	37.5

Nodo No.	Índice de Shimbel	Longitud media de la vía	Accesibilidad topológica relativa
68	15	0.082873	25
69	17	0.093923	50
70	20	0.110497	87.5
71	13	0.071823	0
72	19	0.104972	75
73	15	0.082873	25
74	15	0.082873	25
75	16	0.088398	37.5
76	16	0.088398	37.5
77	16	0.088398	37.5
78	17	0.093923	50
79	16	0.088398	37.5
80	16	0.088398	37.5
81	16	0.088398	37.5
82	18	0.099448	62.5
83	17	0.093923	50
84	16	0.088398	37.5
85	15	0.082873	25
86	18	0.099448	62.5
87	19	0.104972	75
88	19	0.104972	75
89	18	0.099448	62.5
90	17	0.093923	50
91	16	0.088398	37.5
92	19	0.104972	75
93	18	0.099448	62.5
94	17	0.093923	50
95	20	0.110497	87.5
96	15	0.082873	25
97	18	0.099448	62.5
98	18	0.099448	62.5
99	17	0.093923	50
100	18	0.099448	62.5
101	16	0.088398	37.5
102	17	0.093923	50
103	19	0.104972	75
104	18	0.099448	62.5
105	20	0.110497	87.5
106	19	0.104972	75

Nodo No.	Índice de Shimbel	Longitud media de la vía	Accesibilidad topológica relativa
107	20	0.110497	87.5
108	19	0.104972	75
109	21	0.116022	100
110	18	0.099448	62.5
111	19	0.104972	75
112	17	0.093923	50
113	18	0.099448	62.5
114	17	0.093923	50
115	16	0.088398	37.5
116	15	0.082873	25
117	15	0.082873	25
118	14	0.077348	12.5
119	15	0.082873	25
120	15	0.082873	25
121	15	0.082873	25
122	15	0.082873	25
123	15	0.082873	25
124	15	0.082873	25
125	17	0.093923	50
126	16	0.088398	37.5
127	15	0.082873	25
128	15	0.082873	25
129	14	0.077348	12.5
130	14	0.077348	12.5
131	14	0.077348	12.5
132	15	0.082873	25
133	14	0.077348	12.5
134	17	0.093923	50
135	15	0.082873	25
136	14	0.077348	12.5
137	15	0.082873	25
138	14	0.077348	12.5
139	17	0.093923	50
140	16	0.088398	37.5
141	17	0.093923	50
142	16	0.088398	37.5
143	17	0.093923	50
144	17	0.093923	50
145	15	0.082873	25

Nodo No.	Índice de Shimbel	Longitud media de la vía	Accesibilidad topológica relativa
146	15	0.082873	25
147	15	0.082873	25
148	14	0.077348	12.5
149	15	0.082873	25
150	16	0.088398	37.5
151	19	0.104972	75
152	21	0.116022	100
153	20	0.110497	87.5
154	19	0.104972	75
155	20	0.110497	87.5
156	18	0.099448	62.5
157	18	0.099448	62.5
158	18	0.099448	62.5
159	19	0.104972	75
160	17	0.093923	50
161	16	0.088398	37.5
162	15	0.082873	25
163	17	0.093923	50
164	17	0.093923	50
165	16	0.088398	37.5
166	17	0.093923	50
167	17	0.093923	50
168	15	0.082873	25
169	15	0.082873	25
170	17	0.093923	50
171	17	0.093923	50
172	16	0.088398	37.5
173	18	0.099448	62.5
174	17	0.093923	50
175	16	0.088398	37.5
176	17	0.093923	50
177	15	0.082873	25
178	19	0.104972	75
179	18	0.099448	62.5
180	16	0.088398	37.5
181	17	0.093923	50

4.8 Discusión

Respondiendo a la hipótesis planteada de que los sensores se ubican en los arcos de menor tiempo por ser estos los más atractivos para los usuarios de la red. Por un lado se tiene que el árbol de mínima expansión, mostrado en la figura 4.5, suele englobar una cantidad de nodos, a través de los arcos que los unen y que cuenten con el menor tiempo de viaje a flujo libre. Los nodos incluidos en el árbol de mínima expansión son los centroides. Además se muestra que la solución mostrada por las técnicas clásicas y por las heurísticas se encuentra incluida dentro del árbol de mínima expansión. Cosa que no sucede en el caso del análisis de Hu *et al.*, ya que no abarca en su totalidad el conjunto de arcos linealmente independientes. Por otro lado se tiene que el modelo desarrollado con EE ubica los sensores sobre los arcos con menor tiempo de viaje, observando una alta compatibilidad con otras técnicas de optimización.

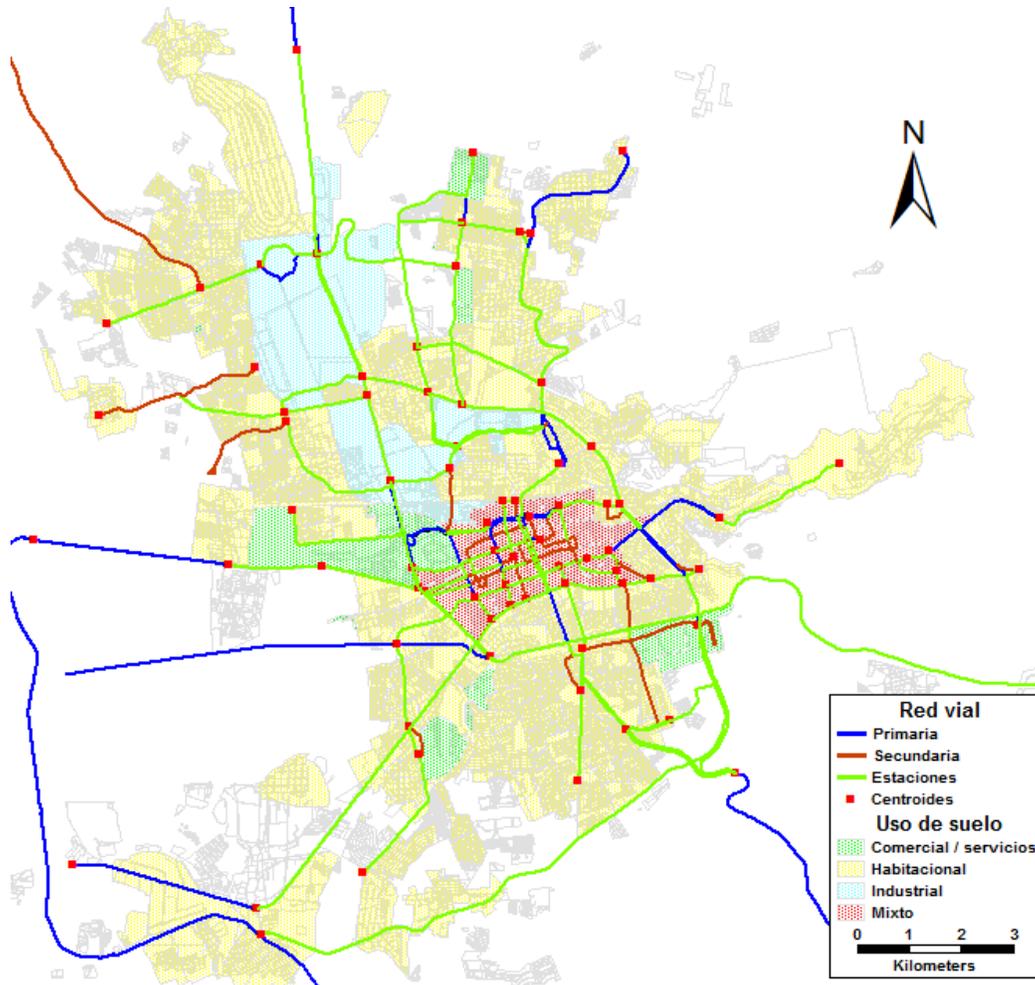


Figura 4.5 Árbol de mínima expansión de la red urbana de Querétaro, con un tiempo total de 61148 minutos.

La figura 4.6 muestra la representación de los pares OD sobre la red utilizando la técnica de asignación de tráfico denominada Todo o nada, donde también se observa que los arcos por donde pasa el flujo vehicular coincide para los flujos más grandes con la distribución del árbol de mínima expansión.

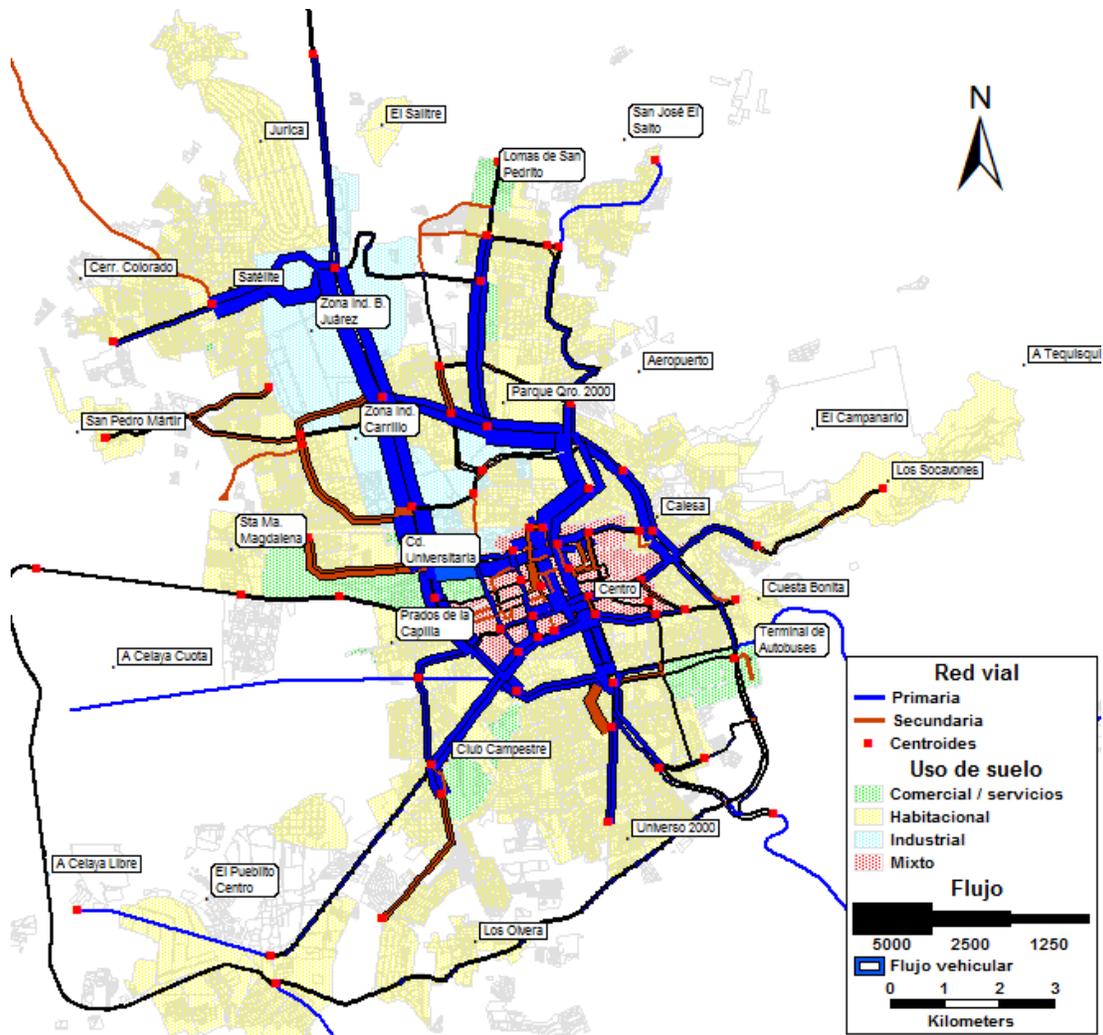


Figura 4.6 Representación de los viajes de la matriz OD sobre la red utilizando una técnica de asignación denominada Todo o nada.

De igual forma la figura 4.7 muestra la representación de los pares OD sobre la red utilizando la técnica de asignación de tráfico denominada Equilibrio del usuario, donde se observa que los arcos por donde pasa una cantidad mayor de flujo vehicular son parte del árbol de mínima expansión. En este caso en particular se toma en cuenta el congestionamiento por lo que el número de arcos es mayor, pero los arcos donde empiezan a aparecer vehículos tienen un flujo vehicular pequeño comparado con los de la asignación Todo o nada.

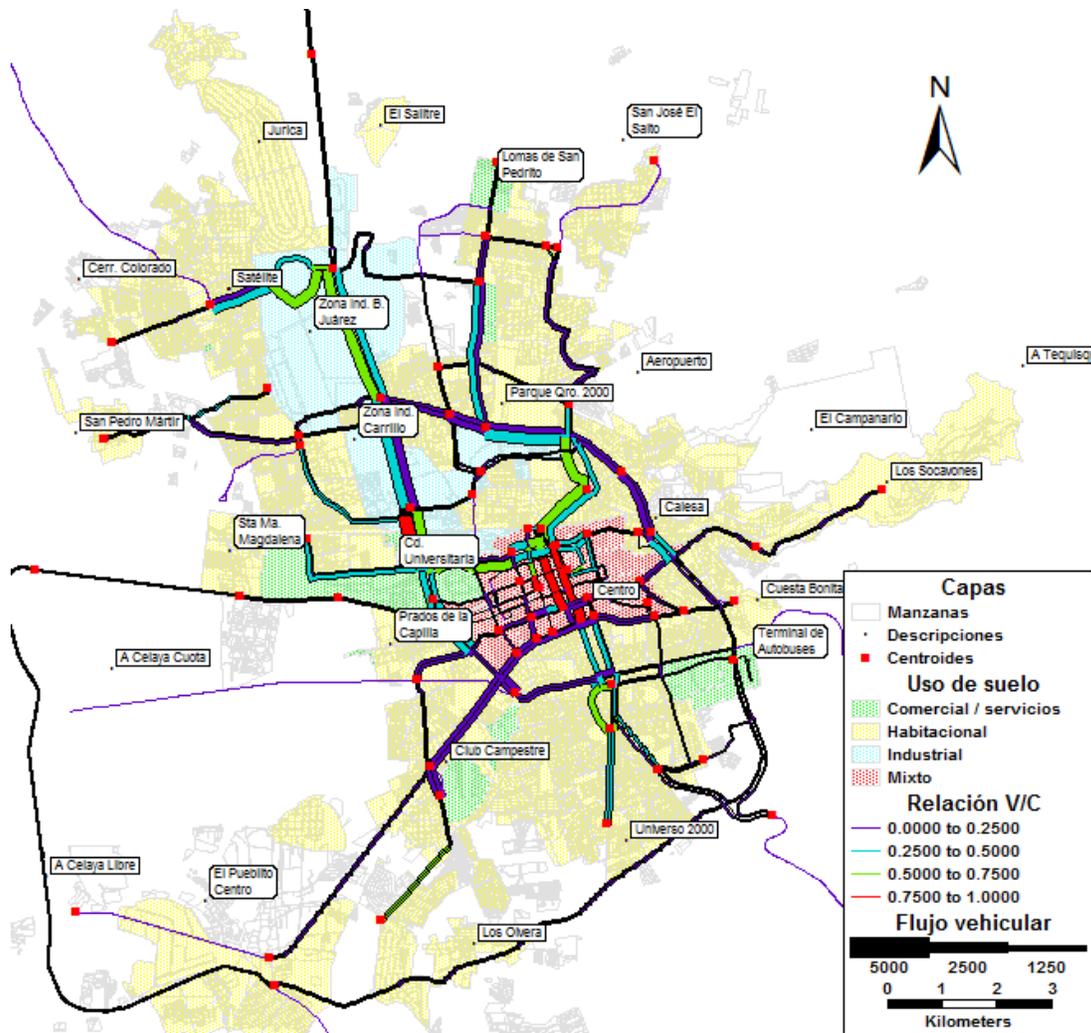


Figura 4.7 Representación de los viajes de la matriz OD sobre la red utilizando una técnica de asignación denominada Equilibrio del usuario.

Este análisis fue probado en otras redes y dado que se obtuvieron resultados similares se elaboró el siguiente procedimiento para encontrar la localización de los sensores:

- Encontrar el árbol de mínima expansión exclusivamente entre los centroides (los cuales son los arcos potenciales donde se localizarán los sensores).
- Como segundo paso se seleccionan los arcos con menor tiempo de viaje (tantos como estaciones se requieran).

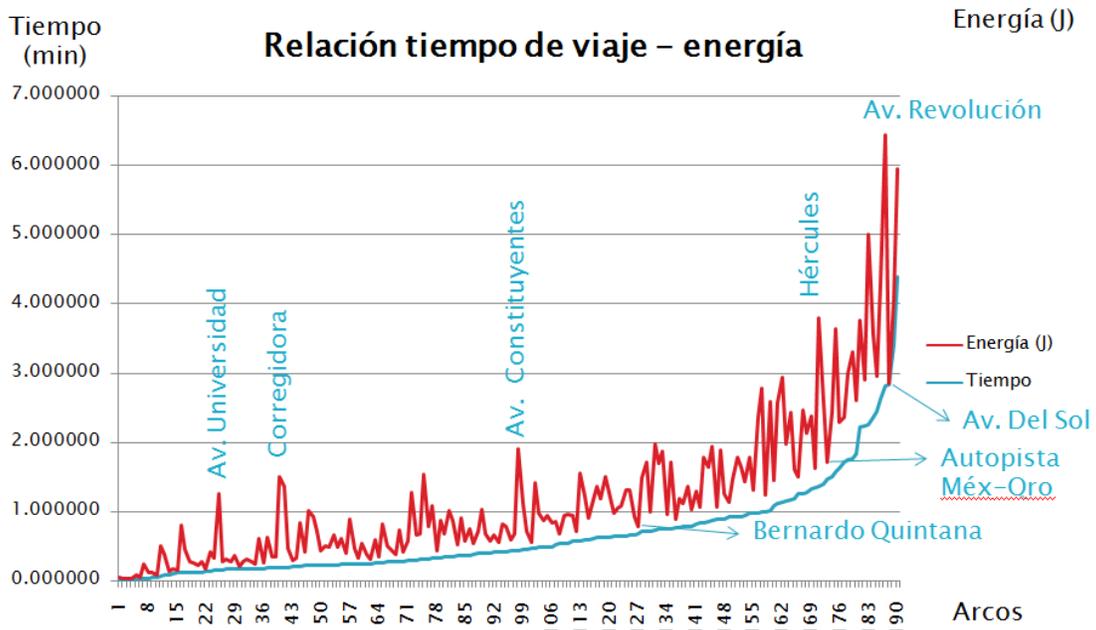


Figura 4.9 Relación entre el tiempo de viaje en cada arco y el consumo de combustible en cada arco.

En la figura 4.10 se muestra la relación entre el congestionamiento vial medido en el modelo de asignación y la energía en Joules proporcionada por el modelo de daño al pavimento.

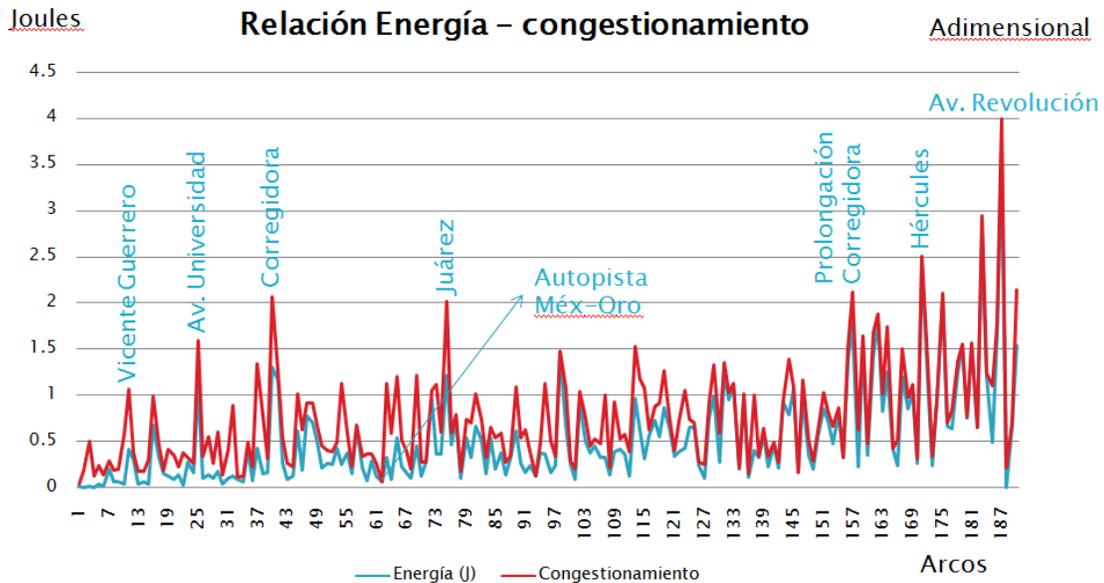


Figura 4.10 Relación entre el congestionamiento vial y el daño al pavimento aplicado por el paso de los vehículos.

Como se puede apreciar existe una estrecha relación entre el congestionamiento vial y el daño al pavimento. A medida que aumenta el congestionamiento vial se puede apreciar que también aumenta el daño al pavimento y mientras el nivel de congestionamiento disminuye el daño al pavimento también lo hace, no en la misma proporción, pero disminuye.

También se puede apreciar que los arcos considerados, de acuerdo al modelo de asignación, como de los más congestionados se encuentran las avenidas: Universidad, Corregidora, Constituyentes, Hércules y Revolución en las cuales en algunas de ellas se encontraron constantemente baches, topes, obras en construcción o el paso de varias rutas. De igual manera se observa que en algunas de las avenidas primarias como son: Bernardo Quintana, la autopista México-Querétaro y la avenida del Sol presentan un menor congestionamiento y por ende menor daño al pavimento.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los comportamientos de los modelos son coincidentes en cuanto a su variación y se pudo corroborar con la superposición del modelo de daño al pavimento con el nivel de congestión reportado por el modelo de asignación.

Las contribuciones más importantes dentro de este trabajo son el desarrollo de un simulador que permite, a través de datos GPS, la estimación y representación del daño al pavimento y el consumo de combustible en cada arco.

Otra contribución es el desarrollo de dos algoritmos, el primero desarrollado en TransCAD que permite la lectura de la información georreferenciada para generar un archivo de salida que será la entrada para el software de Matlab mientras que el segundo es el desarrollo del software en Matlab que evalúa los viajes y la ubicación más conveniente de los sensores utilizando estrategias evolutivas.

Las contribuciones realizadas en las herramientas SIG se ilustran y se validan en la red vial de la zona metropolitana de Querétaro ya que son coherentes con la realidad lo cual permitirá identificar zonas críticas lo que contribuye a la toma de decisiones.

La primera hipótesis planteada se corrobora con los resultados obtenidos en el ejemplo de aplicación con datos reales lo cual muestra que efectivamente existe una relación estrecha entre el nivel de congestión y el daño al pavimento.

La segunda hipótesis planteada resultó ser cierta bajo un ambiente urbano ya que se encontró que para bajos consumos de combustible, se tienen bajos daños al pavimento, mientras que esto no ocurrió para altos consumos de combustible.

La metodología propuesta basada en datos GPS para la evaluación simultánea del camino y del medio ambiente provee distintas salidas como una función del estilo de manejo. Los resultados revelan que la característica

cinemática más influyente del viaje es la dispersión de la aceleración impuesta en el vehículo, medida en términos de su desviación estándar.

Usando estas herramientas para analizar y evaluar distintas redes podría promover el mejor uso de las infraestructuras dentro de una ciudad, reduciendo el impacto ambiental y el costo de mantenimiento de las vialidades por el transporte.

Se demuestra que el estilo de manejo (medido a través del GPS) tiene una influencia mayor sobre el costo de operación de una unidad (medido por las condiciones del camino) por lo que se resalta tanto la importancia del uso de estas herramientas SIG como apoyo para el establecimiento de políticas como para el establecimiento de tarifas.

La utilización de un GPS resultó ser una herramienta de gran ayuda en la obtención de información para ambos modelos, tanto para la evaluación de la infraestructura y el medio ambiente, como para la evaluación de la operación de la red en términos de los viajes asignados.

Como era de esperarse, el modelo ratifica que existe un ahorro en el combustible consumido al circular a una velocidad moderada y por lo tanto, se tiene el máximo avance con el mínimo consumo de combustible.

Un cambio en el estilo de manejo del usuario pasando de uno agresivo a uno amigable podría no sólo influenciar en el medio ambiente o en la infraestructura, sino en la seguridad durante el trayecto.

Dada la complejidad de análisis del NSLP se ha logrado obtener una solución óptima global a través del uso de Estrategias Evolutivas además de que se ha incluido la inclusión del congestionamiento sobre la red cuestión que no había sido analizada en metodologías anteriores.

Se demuestra que no existe relación directa entre la estructura topológica de la red y la localización de los sensores ya que a pesar de que los viajes se distribuyen de acuerdo a la conectividad de la red, no lo hacen en base a este atributo, sino a la característica del tiempo.

Se mostró que efectivamente, aquellos arcos que tienen un menor tiempo de viaje son más propensos a captar una cantidad mayor de viajes y son candidatos potenciales donde se ubique un sensor sobre la red.

La variación no es significativa si hay pequeñas variaciones en el modelo asignado, por el contrario, la variación es significativa cuando cambia la matriz OD.

5.1 Trabajo futuro

En un mediano plazo se pretende mejorar el simulador a través de la integración total de los tres estudios abordados, para ello se realizará la simulación del movimiento vehicular sobre la red en dos dimensiones.

Se pretende llevar a cabo la visualización 3D del vehículo y sus componentes sobre un perfil dado del pavimento como complemento al desarrollo del simulador de daño al pavimento.

Dentro del desarrollo del simulador se visualizará la emisión y distribución de contaminantes a lo largo del recorrido del vehículo de acuerdo al estilo de manejo del usuario.

Se evaluarán más casos reales incluyendo perturbaciones en zonas urbanas como son las aceleraciones y desaceleraciones causadas por los semáforos y topes y el estilo de manejo de los choferes de transporte público.

Se evaluarán cambios de sentido en las vialidades para poder llevar a cabo estudios más rigurosos que incluyan el daño a la infraestructura y al medio ambiente, no sólo el impacto en el tiempo de viaje el usuario.

LITERATURA CITADA

- Aarts, L., and Zomer, G.R. 2010. Where does the growth of road freight transport end and what can policy makers do about it? Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology, HVTT11, Melbourne, Australia, March 14-17, 12 pp.
- Ahn, K., Rakha, H., Trani, A. and Van Aerde, M. 2002. Estimating Vehicle Fuel Consumption and Emissions based on Instantaneous Speed and Acceleration Levels. *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 128, no. 2, pp 182-190.
- Akçelik, R., and Besley, M. 2008. Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION, Proceedings, 25th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR2003), University of South Australia, Adelaide, Australia, 3-5 December 2003
- Amoo-Dodoo, N. and Thorpe, N. 2004. A pavement damage based system for charging HGVS for their use of road infrastructure. Proceedings, Highways Workshop, University of Bergamo, 26-27 November, 2004, 9 pp.
- Archondo-Callao R.S. and Faiz A. 1994. Estimating Vehicle Operating Cost. World Bank Technical Paper Number 234. Washington, D.C. 20433, USA.
- Arnold, R. *et al.* 2010. Reducing Congestion and Funding Transportation. Using Road Pricing In Europe and Singapore. December 2010, Report No. FHWA-PL-10-030, Federal Highway Administration, American Association of State Highway and Transportation Officials National Cooperative Highway Research Program, 58 pp.
- Beasley, J. E.; Chu, P. C. 1996. A genetic algorithm for the set covering problem. *European Journal of Operational Research*, 94, pp. 392-404.
- Bell, M.C. 2008. Environmental factors in future transport. Proceedings of the 40th University Transport Studies Group Conference Southampton, 28 pp.
- Bell, M. G. H. 1983. The estimation of an origin-destination matrix from traffic counts. *Transportation Science*, 17, 198-217.
- Bell, M. G. H. 1991. The estimation of origin-destination matrices by constrained generalized least squares. *Transportation Research*, 25B(1), 13-22.
- Berman, O., Larson, R. and Fouska, N. 1992. Optimal location of discretionary service facilities. *Transportation Science*, vol. 26, 201-211.
- Berman, O., Krass, D. and Xu, C. W. 1995. Locating discretionary service facilities based on probabilistic customer. *Transportation Science*, vol. 29, 276-290.
- Bhatt, K., Higgins, T., and Berg, J.T. 2009. U.S. and Worldwide Experience with Congestion Pricing: An Overview. *TR News*, July–August 2009, number 263, pp 8-13.
- Bienert, Peter. Aufbau einer optimierungsautomatik für drei parameter. Dipl.-Ing. thesis, 1967.
- Bonsall, P., and Knockaert, J. 2008. Recommendations for differentiated charges for car drivers, DIFFERENT project office, Deliverable 9.3, Transport Research Institute, 39 pp.

- Boquete, L., Rodríguez-Ascariz, J. M., Barea, R., Cantos, J., Miguel-Jimenez, J. M. and Ortega, S. 2010. Data Acquisition, Analysis and Transmission Platform for a Pay-As-You-Drive System. *Sensors*, vol. 10, 5395-5408.
- Bosque, Sendra J. 1992. *Sistemas de Información Geográfica*. Rialp Editorial, Madrid.
- Brenninger-Göthe, M., Jörnsten, K. O., and Lundgren, J. T. 1989. Estimation of origin-destination matrices from traffic counts using multiobjective programming formulations. *Transportation Research*, 23B(4), 257-269.
- Caliper Corporation. 2004. "Computer-Aided Design System for Transportation (TransCAD)". <http://www.caliper.com/>, fecha de consulta: Noviembre 14, 2009.
- Cascetta, E. 1984. Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalized least squares estimator. *Transportation Research*, 18B, 289-299.
- Cascetta, E. and Nguyen, S. 1988. A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research*, 22B, 437-455.
- Cassias, I., and Kun, A.L. 2007. *Vehicle Telematics: A Literature Review*, Technical Report ECE.P54.2007.9, October 30, 2007, 28 pp.
- Castillo, E., Conejo, A. J., Pruneda, R. E., and Solares, C. 2007. Observability in linear systems of equations and inequalities: applications. *Computers and Operations Research* 34(6), 1708-1720.
- Castillo, E., Conejo, A. J., Menéndez, J. M., and Jiménez, P., 2008a. The observability problem in traffic network models. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23(3), 208-222.
- Castillo, E., Jiménez, P., Menéndez, J. M., and Conejo, A. J., 2008b. The observability problem in traffic models: algebraic and topological methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 9(2), 275-287.
- Castillo, E., Menéndez, J. M., and Sanchez-Cambronero, S., 2008c. Traffic estimation and optimal counting location with path enumeration using Bayesian networks. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 23(3), 189-207.
- Castillo, E., Menéndez, J. M., and Jiménez, P., 2008d. Trip matrix and path flow reconstruction and estimation based on plate scanning and link observations. *Transportation Research Part B* 42(5), 455-481.
- Centeno, S.A.G., and Mendoza, D.A., 2003. *Publicación Técnica No. 222, Modelo de asignación intermodal multiproducto para las operaciones de carga por autotransporte y ferrocarril*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Chin, S-M, Hwang, H-L. 2006. Converting Freight Flow information to Truck Volumes *Transportation Research Board 2006 Annual Meeting*, Washington, D.C., Enero 2006.
- Chu, C.-P., and Tsai, J.F. 2004. Road-pricing models with maintenance cost. *Transportation*, Vol. 31(4), pp 457-477.
- Citilabs 2006. "Cube" <http://www.citilabs.com>, fecha de consulta: Noviembre 25, 2009.
- Coello, Coello Carlos A. 2007. *Introducción a la Computación Evolutiva (Notas de Curso)*. Departamento de Computación, CINVESTAV-IPN.

- Collop, A.C. 1994. Effects of traffic and temperature on flexible pavement wear. Ph.D. Thesis. Cambridge University, 324 pp.
- COMHAR. 2008. Sustainable travel and transport action plan. Comhar sustainable development council – response to public consultation. Ireland, May 2008 104 pp.
- CONCYTEQ. 2001. Diagnósticos de transporte, Ciudad de Querétaro, Querétaro Consejo de Ciencia y Tecnología. ISBN 968-5402- 03-5, 120 pp.
- Cortés, C.E., Gibson, J., Gschwender, A., Munizaga, M., & Zúñiga, M. 2010. Commercial bus speed diagnosis based on GPS-monitored data. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Volume 19, Issue 4, pp 695-707.
- Deb, K. 1999. An Efficient Constraint Handling Method for Genetic Algorithms. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, (in Press).
- De Corla-Souza, P. and Matthew E. MacGregor. 2009. New Ideas for Congestion Pricing. TR News, July–August 2009, number 263, pp 39-42.
- De la Llata, G. R. 1990. Publicación Técnica No. 48, “Estrategias para la realización de Estudios Origen-Destino”. Instituto Mexicano del Transporte.
- De Smith M. J., Goodchild M. F., Longley P. A. 2007. Geospatial analysis: A comprehensive guide to principles, techniques and software tools. 2nd edition, Troubador, UK
- Denault, L. 1994. Étude de deux methods d’ajustement de matrices origine-destination à partir des flots des véhicules observes (in French), Report CRT-991, Mémoire D’étudiant, Centré de recherché sur les transports (CRT), University of Montréal, Québec, Canada.
- Dudleya, G., Goodwina, Ph., Lyonsa, G., Musselwhitea, Ch., and Wiltshirea, P. 2010. Lost in translation: problems in interpreting business attitudes to transport. Transportation Planning and Technology, Vol. 34, No. 1, February 2011, pp 35-50.
- ECOWILL. 2010. What is Ecodriving. Austrian Energy Agency, <http://www.ecodrive.org/en/home/>. Date: March 2011.
- EGNSSA. 2011. GNSS-based metering for vehicle applications. European GNSS Agency. <http://www.gnssmeter.eu/benefits.htm>, date: March 4, 2011.
- Ehlert, A., Bell, M. G. H. and Grosso, S. 2006. The optimization of traffic count locations in road networks. Transportations Research Part B, Vol. 40B, 460-479.
- Eisenman, S. M., Fei, X., Zhou, X. and Mahmassani, H. S. 2006. Number and Location of Sensors for Real-Time Network Traffic Estimation and Prediction. Sensitivity Analysis. Transportation Research Record, No. 1964, 253-259.
- EPA. 1991 Options for environmental protection, Environmental Protection Agency, marzo 1991, Reporte 21P-2001, 117 pp.
- Fei, X., Mahmassani, H. S. and Eisenman, S. M. 2007. Sensor Coverage and Location for Real-Time Traffic Prdiction in Large-Scale Networks. Transportation Research Record, No. 2039, 1-15.
- Fisk, C. S. 1989. Trip matrix estimation from link traffic counts: the congested network case. Transportation Research, 23B.

- Fogel, David B. 1998. *Evolutionary Computation. The Fossil Record. Selected Readings on the History of Evolutionary Algorithms.* The Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York.
- Fosgerau, M., van Dender, K. 2010. Road pricing with complications. OECD/ITF Joint Transport Research Centre, Proceedings, Round table, 4-5 February 2010, Paris, 30 pp.
- Frawley, W. E. 2004. A methodology for randomly selecting traffic count locations in Texas – results and benefits. Texas Transportation Institute.
- Frey, H.C., Choi, H.W., Pritchard, E., and Lawrence, J. 2009. In-Use Measurement of the Activity, Energy Use, and Emissions of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle. Paper 2009-A-242-AWMA, Proceedings, 102nd Annual Conference and Exhibition, Air & Waste Management Association, Detroit, Michigan, June 16-19, 18 pp.
- Friedberg, S. H., Insel, A. J. and Spense, L. E. 2003. *Linear Algebra.* Pearson Education, Upper Saddle River. NJ.
- Friedrich B. and Wang, Y. P. 2004. Improvement of OD Estimation Based on Disaggregated Flow Information. *Advanced OR and AI Methods in Transportation. Proceeding of the 16th Mini-EURO Conference and 10th Meeting of EWGT.*
- Friedrich B. and Wang, Y. P. 2005. Effectiveness of Data Composition on OD Matrix Estimation. Institute for Transport, Road Engineering and Planning, University of Hannover.
- Frybour M. 1974. *Les Systèmes de Transport (Planification et décentralisation).* Paris: Collection TIEN PHUC, N. Ed. Eyrolles.
- Garrido, Palacios J. 1995. La organización especial de la red de carretera en Aragón. Aplicación de la metodología de la teoría de grafos.
- Garrido, R. A. 2008. Road Pricing for Hazardous Materials Transportation in Urban Networks. *Netw Spat Econ* (2008) 8, pp 273–285.
- Gentili, M., Mirchandani, P. 2004. “Locating Image Sensors on Traffic Networks,” Proceedings of the Triennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN V, Le Gosier, Guadeloupe, French West Indies, June 13 – 18.
- Gentili M, Mirchandani P. 2005. Locating Active Sensors on Traffic Networks. *Annals of Operations Research.* 136, pp. 229-257.
- Goldberg, D. E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,* Addison-Wesley, Reading, MA.
- Goldberg, David E., and Kalyanmoy Deb. 1991. A comparison of selection schemes used in genetic algorithms. In Gregory J. E. Rawlins, editor, *Foundations of Genetic Algorithms,* pages 69–93. Morgan Kaufmann, San Mateo, California.
- Gosling, J., Joy, B., Steele, G. y Bracha G. 2005. *The Java language specification, tercera edición.* Addison-Wesley.
- Grugett, B., Reineman, M., and Thompson, G. 1981. The Effects of Tire Inflation Pressure on Passenger Car Fuel Consumption. SAE Technical Paper 810069, 9 pp.
- Gu, W. and Jia, X. 2005. On a traffic control problem. In Proceedings of the 8th International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms and Networks.

- Hai, Y., Tsuna, S., and Yasunori, I. 1992. Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks, *Transportation. Research part B*. Vol. 26B, No. 6, pp. 417-434.
- Hakimi, S. L., 1964. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research* 12, 450-459.
- Hakimi, S. L., 1965. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. *Operations Research* 13, 462-475.
- Han, A.F., and Sullivan, E.C. 1983. Trip table synthesis for CBD networks: Evaluation of the LINKOD model. *Transportation Research Record* 944, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 106-112.
- Handy, S. L., and Krizek, K.J. 2009. The Role of Travel Behavior Research in Reducing the Carbon Footprint: From the U.S. Perspective. *Proceedings, The 12th International Conference on Travel Behaviour Research*, Jaipur, Rajasthan, India, December 13-18, 2009.
- Hazelton, M. 2000. Estimation of origin-destination matrices from link flows on uncongested networks. *Transportation Research*, 34B, 549-566.
- Hellinga, B. and Chan, T.N. 2002. Issues Related to Quantifying the Environmental Impacts of Transportation Strategies using GPS Data. *Proceedings of the Annual Conference of the Canadian Institute of Transportation Engineers*, May 12-15, 2002, Ottawa, Canada, 19 pp.
- Hendrickson, C. M. and Siddarthan, K. 1981. A method for estimation of origin/destination trip matrices. *Transportation Science*, 15, 32-49.
- Hine, J.L., Pangihutan-Sinaga, H., and Rudjito, D. 2000. Transport costs for highway planning in Indonesia: results from new research into speed and fuel consumption in congestion, values of passenger time and vehicle maintenance costs. *Transport Research Laboratory, Report IRRD E107409*, 11 pp.
- Hodgson, M.J. 1990. "A flow-capturing location-allocation model." *Geographical Analysis, Annals of Operations Research*. 22: 271-279.
- Holguín-Veras, J., Cetin, M., and Xia, S. 2006. A comparative analysis of US toll policy. *Transportation Research Part A* 40, pp 852-871.
- Holland, J. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor.
- Horowitz, A. J. 1991. *Delay-Volume Relations for Travel Forecasting: Based on the 1985 Highway Capacity Manual*". Department of Civil Engineering and Mechanics University of Wisconsin. Prepared for the Federal Highway Administration U.S. Department of Transportation.
- Hu, Sh. R., Peeta, S., and Chu, Ch. H. 2009. Identification of vehicle sensor locations for link-based network traffic applications. *Transportation Research Part B*, No. 43, 873-894.
- Hubbard, P. 2009. Urban congestion – why “free” roads are costly, *Economic Roundup Issue 2, 2009, Australian Treasury*, 20 pp.
- Iannó, D. and Postorino, M. N. 2002. Origin/Destination trip matrix estimation with generation constraints. *Mediterranean University of Reggio Calabria - Italy*.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2011. *Censo de población y vivienda 2010*.

- INRO. 2006. "EMME/2" <http://www.inro.ca/en/products/emme/index.php>, fecha de consulta: Octubre 12, 2009.
- INRO. 2006. "EMME/3" <http://www.inro.ca/en/products/emme/index.php>, fecha de consulta: Octubre 12, 2009.
- INRO. 2006. "STAN" <http://www.inro.ca/en/products/emme/index.php>, fecha de consulta: Septiembre 02, 2009.
- Instituto Mexicano del Transporte. 2009. Manual Estadístico del Sector Transporte 2009.
- Johnsonbaugh, Richard. 2005. Matemáticas Discretas, 6ta Edición. De Paul University, Chicago. Prentice Hall.
- Kawakami, S., Lu, H., and Hirobata, Y. 1992. Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts considering the interaction of the traffic modes. *Papers in Regional Science*, 71.
- Kim, H. J., Chung, I. H., Chung, S. Y. 2003. Selection of the Optimal Traffic Counting Locations for Estimating Origin-Destination Trip Matrix. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5, pp. 1353-1365.
- Komanoff, Ch. 1997. Environmental Consequences of Road Pricing. A Scoping Paper for The Energy Foundation. 24 pp.
- Koniditsiotis, X., Girgis, P. 2010. Intelligent Access Program - Update on Heavy Vehicle Monitoring, Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology – Australia – 2010, 11 pp.
- Koskinen, X. 2010. Nordic Vehicle Configuration from Viewpoint of Fuel and Transport Economy Emission Reduction and Road Wear Impact. Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology – Australia – 2010, 24 pp.
- Lam, W.H.K. y Lo, H.P. 1990. "Accuracy of OD estimates from traffic counts." *Traffic Engineering and Control*, 31: 358-367
- Larson, R. and Odoni, B. 1981. *Urban Operations Research*, Prentice-Hall
- Lee, S.H., Walters, S.D., and Howlett, R.J. 2008. Intelligent GPS-Based Vehicle Control for Improved Fuel Consumption. *KES 2008, Part III, LNAI 5179*, pp. 701–708, 2008.
- Liu, Y., Lai, X., and Chang, G. L. 2004. Optimal Detector Locations for OD Matrix Estimation. *Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering. Proceedings of 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering.*
- Lo, H., Zhang, N., and Lam, H. 1996. Estimation of an origin-destination Matrix with random link choice proportions: a statistical approach. *Transportation Research*, 30B, 309-324.
- Lo, H., Zhang, N., and Lam, H., W.H.K. 1999. Decomposition algorithm for statistical estimation of OD matrix with random link choice proportions from traffic counts. *Transportation Research*, 33B, 369-385.
- Logie, M., and Hynd, A. 1990. MVESTM matrix estimation. *Traffic Engineering and control*, Vol 31, 454-459.
- Long, F. M. and Theyse, H. L. 2004. Mechanistic-Empirical Structural Design Models for Emulsified Bitumen Treated Materials. Report No: CR-2003/44, South African Bitumen Association.

- Lotz C. 2002. Ermittlung von Detektorstandorten für den Straßenverkehr innerorts. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt. Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Darmstadt.
- Mahendra, A. 2008. Vehicle Restrictions in Four Latin American Cities: Is Congestion Pricing Possible?. *Transport Reviews*, Vol. 28, No. 1, 105–133, January 2008, 30 pp.
- Maher, M. J. 1983. Inferences on trip matrices from observations on link volumes: A Bayesian statistical approach. *Transportation Research*, 17B(6), 435-447.
- Marmy, J. 2010. Sustainable road transport: a key component of the global economy. Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology – Australia – 2010.
- Martin, T., Thoresen, T., and Clarke, M. 2010. Estimating the marginal cost of road wear on Australia's sealed road network. Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology – Australia – 2010, 12 pp.
- Matschke, I., Friedrich, B. 2001. "Dynamic OD Estimation Using Additional Information from Traffic Signal Lights Timing," Proceedings of the Triennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN IV, Sao Miguel - Azores, Portugal, June 13-19, 589-593.
- Matschke I, Friedrich B, Heinig K (2004): Data Fusion Technique in the Context of Traffic State Estimation. Proceedings of the Triennial Symposium on Transportation Analysis TRISTAN V. Le Gosier, Guadeloupe, French West Indies.
- McNeil, S. and Hedrickson, C. 1985. A regression formulation of the Matrix Estimation Problem. *Transportation Science* 19, 278-292.
- Meirovitch, L. 1986. Elements of vibration analysis. Mc Graw Hill Int., 2nd ed., 345 pp.
- Mendoza, D. A., Centeno, S. A. G. and Mayoral, G. E. F. 2005. Publicación Técnica No. 268, Modelo de asignación para los flujos de libramiento y acceso al área metropolitana de la ciudad de México. Instituto Mexicano del Transporte.
- Mendoza, D. A., García, Ch. A. 2006. Informe de Investigación SE-12/06 Estudio de licencias. Instituto Mexicano del Transporte.
- Michalewicz, Z. 1992. Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Molinero Molinero Ángel R. y Sánchez Arellano Luis Ignacio. 1997. Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración, 2da Edición. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Morrison, D. R. 2008. Characteristics of Optimal Solutions to the Sensor Location Problem. Harvey Mudd College, Department of Mathematics Transportation Research Record, No. 2049, 103-110.
- MTDD. 2006. Mobilité, transport et environnement, Rapport de la Commission des comptes et de l'économie de l'environnement, Ministerio de la Ecología y del desarrollo durable, Paris, 2006, 405 pp.
- Ng WS, Schipper L (2006): China Motorization Trends, Consequences and Alternatives. Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D.C.

- Nielsen, O. A. 1993. A new Method for Estimating Trip Matrices from Counts. Institute of Roads, Traffic and Town Planning: The Technical University of Denmark.
- Nielsen, O. A. 1998. Two new Methods for Estimating Trip Matrices from Counts. Travel Behaviour Research: Updating the State of Play. Páginas 221-250, editado por J. Ortúzar, D. Hensher y S. Jara-Díaz. Pergamon Press.
- Nihan N. L. and Hamed, M. M. 1992. Fixed Point Approach to Estimating Freeway Origin-Destination Matrices and the Effect of Erroneous Data on Estimate Precision. Transportation Research Record 1357, 18-28.
- Noland, R., Ochieng, W., Quddus, M., North, R., and Polak, J. 2011. Vehicle Emissions and Performance Monitoring System: Initial Analysis of Tailpipe Emissions and Vehicle Performance. Imperial College, Centre for Transport Studies, London, <http://www.cts.cv.ic.ac.uk>.
- North, R. J., Ochieng, W. Y., Quddus, M.A., Noland, R. B., Polak, J. W. 2005. Development of a vehicle emissions monitoring system. Transport: Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Vol. 158 (3), pp. 167 – 177.
- OECD. 2006. Decoupling the Environmental Impacts of Transport from Economic Growth, Organisation for Economic Co-operation and Development, ISBN 92-64-02712-2, 118 pp.
- Ozbay, K., Bartin, B., Yanmaz-Tuzel, O. and Berechman, J. 2007. Alternative methods for estimating full marginal costs of highway transportation. Transportation Research Part A 41 (2007), pp 768–786.
- Palmer, A. 2007. The development of an integrated routing and carbon dioxide emissions model for goods vehicles, Ph.D. Thesis, Cranfield University, School of Management, November 2007, 161 pp.
- Papageorgiou *et al.* 2007. ITS and Traffic Management. Chapter 11, Handbook in OR & MS, Vol. 14, Elsevier B.V., pp 715-774.
- Parker, N. A, and Hussain, S. 2006. Pavement Damage and Road Pricing. Transportation Research Board Annual Meeting 2006 Paper #06-1342.
- Porter, J.D. Kim, D.S. 2008. An RFID-Enabled Road Pricing System for Transportation. Systems Journal, IEEE, Vol. 2 Issue: 2 , pp 248-257.
- Potrikowsky, M. y Taylor, Z. 1984. Geografía del Transporte. Editorial Ariel, Barcelona.
- PTV, “Traffic Mobility Logistics”. 2006. VISUM <http://www.vissim.de>, Fecha de consulta: Septiembre 18, 2009.
- PTV, “Traffic Mobility Logistics”. 2006. VISSIM http://www.vissim.de/cgi-bin/traffic/traf_visum.pl, Fecha de consulta: Septiembre 18, 2009.
- Quak, H., and van Duin, J.H.R. 2010. The influence of road pricing on physical distribution in urban areas. Procedia Social and Behavioral Sciences 2 (2010), pp. 6141–6153.
- Quintanilla, Miguel Ángel y Sánchez Ron, José Manuel. 1997. Ciencia, Tecnología y Sociedad. España.
- Quoy, O. and Jacob, B. 2010. Road pricing in France: Pay-per-kilometre eco-tax on heavy goods vehicles. Proceedings, 11th International Symposium on Heavy Vehicle Transportation Technology – Australia – 2010, 11 pp.
- Rakha, H., Lucic, I., Demarchi, S., Van Aerde, M., and Setti, J. 2001. Vehicle Kinematics Model for Predicting Maximum Truck Acceleration Levels.

- Transportation Research Board 2001 Annual Meeting, Washington, January 2001.
- Rechenberg, Ingo. 1973. *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*. Frommann–Holzboog, Stuttgart, Alemania.
- Reeves, C. B. 1993. *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, John Wiley & sons, Great Britain.
- Rico G.O. 2005. *Publicación Técnica No. 269, Análisis espacial de la distribución de la carga transportada por aire en México*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Robillard P. 1975. Estimating the OD Matrix from Observed Link Volumes. *Transportation Research* 9, 123-128.
- Romero, J.A., and Lozano, A. 2006. Effect of trucks suspension and tire properties on pavement damage spatial distribution. *The Transportation Research Record (TRR), Journal of the Transportation Research Board No. 1949*, pp 148-154.
- Schlingelhof, M., Krajzewicz, D., and Kühne, R. 2006. New GNSS-based approaches for advanced driver assistance systems. *Proceedings, TRB 85th Annual Meeting, January 22-26, 2006 Washington*
- Schmedding, D. Liedtke, G., Ott, A., and Wessels, L. 2006. GIS-based analysis of road transport related noise impacts. *Proceedings, 85th TRB Annual Meeting, 2006, Washington, D.C., 14pp.*
- Schuessler, N., and Axhausen, K.W. 2010. Processing raw data from global positioning systems without additional information. *Transportation Research Record* 2105, pp 28-36.
- Schwefel, Hans-Paul. 1965. *Kybernetische evolution als strategie der experimentellen forschung in der strömungstechnik*. Dipl.-Ing. thesis.
- Schwefel, Hans-Paul. 1977. *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*. Birkh"auser, Basel, Alemania.
- Schwefel, Hans-Paul. 1981. *Numerical Optimization of Computer Models*. Wiley, Chichester, UK.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. 1988. *Sogelerg, Programación Sectorial del Transporte, Esquemas Directores Subsectoriales, Subsector Carretero, Anexos Técnicos*. México. pp. 935-964.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT). 2010. <http://www.sct.gob.mx/index.php?ie=ISO-8859-1&oe=ISO-8859-1&id=139&cx=013445427454834400542%3A3v-k71I0yna&cof=FORID%3A11&q=millones+de+pesos+estudio+origen+destino#1331>, fecha de consulta: Enero 20, 2010.
- Singiresu, S. Rao. 2008. *Engineering Optimization. Theory and Practice*. John Wiley & sons, Inc., third edition.
- Small, K.A. 2004. Road pricing and public transport. *Research in Transportation Economics*, Vol. 9, Georgina Santos, editor. Elseiver Ltd, pp 133-158.
- Sorensen, P. Ecola, L, Wachs, M., Donath, M., Munnich, L., and Serian, B. 2009. *Implementable Strategies for Shifting to Direct Usage-Based Charges for Transportation Funding*. National Cooperative Highway Research Program, Web-only document 143, 150 pp.

- Spiess H. 1987. A maximum-likelihood model for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research*, 21B.
- Spiess H. 1990a. Conical Volume-Delay Functions. *Transportation Science*, Vol 24, No. 2.
- Spiess, H. 1990b. A gradient approach for the O-D matrix adjustment problem. Centre de Recherche sur les Transports. Publication No. 693. http://www.inro.ca/en/pres_pap/international/ieug90/Paper01_1990.pdf, fecha de consulta: Febrero 20, 2009.
- Tamin, O. Z., Suyuti, R. 2003. "The Impact of Location and Number of Traffic Counts in the Accuracy of OD Matrices Estimated from Traffic Counts under Equilibrium Condition: A Case Study in Bandung (Indonesia)," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 5: 393-1407.
- Taylor, B., Kalasuskas, R., and Iseki, H. 2010. Addressing Equity Challenges to Implementing Road Pricing, California PATH Research Report, UCB-ITS-PRR-2010-6, 69 pp.
- Thiele, J. 2009. Road pricing to reduce congestion, pollution, and injury accidents, Essay, University of Nebraska – Lincoln, Midwest roadside safety facility. 6 pp.
- Thomás, A. P. 2001. Modelling Optimal Location of Traffic Counting Points at Urban Intersections in CLP (FD). Technical Report Series: DCC-2001-4, Departamento de Ciência de Computadores – Faculdade de Ciências & Laboratório de Inteligência Artificial e Ciência de Computadores. Universidade de Porto.
- Thurston, J., Poiker, T.K. and J. Patrick Moore. 2003. *Integrated Geospatial Technologies: A Guide to GPS, GIS, and Data Logging*. Hoboken, New Jersey: Wiley
- Torres, V. Guillermo y Hernández, G. Salvador. Propuesta metodológica para la estimación del valor del tiempo de los usuarios de la infraestructura carretera en México: el caso del transporte de pasajeros. Publicación técnica No. 291. Instituto Mexicano del Transporte.
- Turnquist, M. and Gur, Y. 1979. Estimation of Trip Tables from Observed Link Volumes. *Transportation Research Record*, 730, 1-6.
- Valdéz, O.N.A. and Mendoza, D.A. 2002. Publicación Técnica No. 206, Desarrollo del Método STAN para la operación del autotransporte de carga por la red carretera. Instituto Mexicano del Transporte.
- Van Zuylen, J. H. 1978. The information minimizing method: Validity and applicability to transport planning. In *New Developments in Modelling Travel Demand and Urban Systems* (Edited by Janden G. R. H., *et al.*). Saxon, Farnborough.
- Van Zuylen, H. J. and Willumsen, L. G. 1980. The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research*, 14B(13), 218-293.
- Viti, F., Verbeke, W., and Tampère, C. 2008. Sensor Locations for Reliable Travel Time Prediction and Dynamic Management of Traffic Networks. *Transportation Research Record*, No. 2049, 103-110.
- Vreeswijk, J.D., van Berkum, E.C., van Arem, B., and van der Vliet, H.A. 2010. Toward effective strategies for energy efficient network management. *Proceedings, 2010 13th International IEEE, Annual Conference on*

- Intelligent Transportation Systems, Madeira Island, Portugal, September 19-22, 2010.
- Vrtic, M., Schuessler, N., Erath, A., and Axhausen, K. W. 2007. Design elements of road pricing schemes and their acceptability. Proceedings, 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board, 2007, Washington.
- Walker, R., and Naberezhnykh, D. 2009. Techniques for Assessment of Road User Charging and Global Navigation Satellite Systems data: Final Report, Customer project, Transportation Research Laboratories, RPN 428
- Wardrop J. G. 1952. Some theoretical aspects of road traffic research. Proc. Inst. Of Civ. Engineers Part 2, 1, 325-378.
- Yang, H., Iida, Y., and Sasaki, T. 1991. An analysis of the reliability of an origin-destination trip matrix estimated from traffic counts. Transportation Research, 25B(5), 351-363.
- Yang, H. and Zhou, J. 1998. "Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation." Transportation Research Part B. 32: 109-126.
- Yim, P. K. N. and Lam, W. H. K. 1998. Evaluation of count location selection methods for estimation of OD matrices. Journal of Transportation Engineering, vol. 124, n4, 376-383.
- Zabic, M. 2006. An ArcGIS analysis of Stand-alone GPS quality for Road Pricing. Proceedings of ESRI International User Conference, San Diego, CA, US.
- Zabic, M. 2009. Road Charging in Copenhagen: A Comparative Study of the GPS Performance. Proceedings, 16th World Congress on Intelligent Transport Systems, Stockholm, Sweden
- Zmud, J., and Arce, C. 2008. Compilation of Public Opinion Data on Tolls and Road Pricing. A Synthesis of Highway Practice, NCHRP Synthesis 377, 65 pp.

APENDICE

**A CODIGO PARA LA RESOLUCIÓN DEL NSLP A TRAVÉS DE
ESTRATEGIAS EVOLUTIVAS**

```

function [y, e, pos]=optimizaEEmo(M)  %%se considera la penalizacion por
las restricciones
% A=[0 1 1 1 0 0 0 0 0 0
%   1 0 0 1 1 0 0 0 0 0
%   1 0 0 1 0 1 0 0 0 0
%   1 1 1 0 1 0 1 0 0 0
%   0 1 0 1 0 0 1 1 0 0
%   0 0 1 0 0 0 1 0 1 0
%   0 0 0 1 1 1 0 1 1 0
%   0 0 0 0 1 0 1 0 0 1
%   0 0 0 0 0 1 1 0 0 1
%   0 0 0 0 0 0 0 1 1 0];
% T=[0 6.27 4.32 6.35 0 0 0 0 0 0
%   6.27 0 0 6.44 0.79 0 0 0 0 0
%   4.32 0 0 4.4 0 2.91 0 0 0 0
%   6.35 6.44 4.4 0 5.31 0 8.8 0 0 0
%   0 0.79 0 5.31 0 0 2.49 4.8 0 0
%   0 0 2.91 0 0 0 7.37 0 3.13 0
%   0 0 0 8.8 2.49 7.37 0 4.47 5.71 0
%   0 0 0 0 4.8 0 4.47 0 0 2.08
%   0 0 0 0 0 3.13 5.71 0 0 5.36
%   0 0 0 0 0 0 0 2.08 5.36 0];
% F=[ 0 9020.08 10418.46 5120.82 0 0 0 0 0 0
%   9020.08 0 0 8448.78 13730.12 0 0 0 0 0
%   10418.46 0 0 10834.11 0 16628.65 0 0 0 0
%   5120.82 8448.78 10834.11 0 11133.22 0 14191.39 0 0 0
%   0 13730.12 0 11133.22 0 0 16901.36 17557.48 0 0
%   0 0 16628.65 0 0 0 10061.26 0 15997.45 0
%   0 0 0 14191.39 16901.36 10061.26 0 14766.08 11885.72 0
%   0 0 0 0 17557.48 0 14766.08 0 0 16366.17
%   0 0 0 0 0 15997.45 11885.72 0 0 15577.87
%   0 0 0 0 0 0 0 16366.17 15577.87 0];
% C=[1 2 3 4 5 6 7 8 9 10];
A=load('Matriz_ady.txt');  %carga la matriz de adyacencia
T=load('Matriz_t.txt');  %carga la matriz de tiempos
F=load('Matriz_f.txt');  %carga la matriz de flujos
C=load('Centroides.txt');  %carga los centroides
[nr nc]=size(A);
[L R]=dijkstra(1,A,T);
for i=2:nr
    [Lt Rt]=dijkstra(i,A,T);
    L=cat(1,L,Lt);
    R=cat(1,R,Rt);
end
%M=100; %numero de iteraciones
pob=10; % numero de elementos de la poblacion
hijos=7*pob; % numero de hijos de la poblacion
[ni nj]=find(T>0); % pares ij que forman los arcos
param=length(ni); % numero de arcos
ne=1+round((param/2-1)*rand);
% numero de estaciones (inicialmente el # de arcos)
% t=1.0/sqrt(2*sqrt(param));
% tp=1.0/sqrt(2*param);
%indice=zeros(pob,1);
[m n]=size(T);
y=zeros(m,n,pob); % y matriz de elementos de la pob
yn=zeros(m,n,hijos); % matrices de hijos

```

```

e=zeros(pob,4); % e vector para guardar los valores que toma la funcion
objetivo (e(1):T, e(2):F, e(3):R)
en=zeros(hijos,4); % e vector para guardar los valores que toma la
funcion objetivo
k=1;
count=0;
while k<=pob % generacion de la poblacion inicial (posible solucion para
acomode de ne estaciones)
    p=1+round((param-1)*rand);
    if (y(ni(p),nj(p),k)==0)&&(y(nj(p),ni(p),k)==0) %para que no haya
mas de 1 estacion en el mismo arco
        y(ni(p),nj(p),k)=1;
        count=count+1;
    end
    if count==ne
        k=k+1;
        count=0;
        ne=1+round((param/2-1)*rand);
    end
end
for j=1:M, % busqueda del optimo en max M iteraciones
    j
    for i=1:hijos, % se hace la seleccion de padres y el cruzamiento
        sel1=1+floor(rand*(pob-1)); % seleccion del primer padre
        sel2=1+floor(rand*(pob-1)); % seleccion del segundo padre
        for k=1:m,
            for l=1:n
                if (round(rand)==0)
                    yn(k,l,i)=y(k,l,sel1);
                else
                    yn(k,l,i)=y(k,l,sel2);
                end
            end
        end
        end
        end
        end
        for i=1:hijos % mutacion intercambio reciproco
            [ren col]=find(yn(:, :, i)>0);
            % if length(ren)>0
                mutal=1+floor(rand*(length(ren)-1));
                muta2=1+floor(rand*(param-1));
                while
                    yn(ren(mutal),col(mutal),i)==yn(ni(muta2),nj(muta2),i)
                        muta2=1+floor(rand*(param-1));
                    end
                    if yn(ren(mutal),col(mutal),i)~=yn(ni(muta2),nj(muta2),i)
                        yn(ren(mutal),col(mutal),i)=yn(ni(muta2),nj(muta2),i);
                        yn(ni(muta2),nj(muta2),i)=1-
                            yn(ren(mutal),col(mutal),i);
                    end
                % end
            end
            for i=1:hijos, %evaluacion de la funcion obj para cada uno de los
hijos
                en(i,:)=Jo(yn(:, :, i),T,F,C,R); %x=conj de parametros, p=%estimar
            end
        for i=1:pob,

```

```

        y(:,:,i)=yn(:,:,i); % se reemplaza la poblacion por los
primeros pob=20 hijos
        e(i,:)=en(i,:); % se inicializa e() con los
primeros pob=20 errores de los hijos
    end
    for l=21:hijos, % se hace la seleccion de los 20=pob mejores
        maximo=e(1,:);
        posicion=[1 1];
        for i=1:pob,
            if (maximo(2)<=e(i,2))%% se busca al peor de las estaciones
en la pob
                maximo(1,:)=e(i,:);
                posicion(2)=i;
            end
            % if (maximo(2,2)<e(i+1,2))%% se busca al peor de los tiempos
en la pob
            % maximo(2,:)=e(i+1,:);
            % posicion(2)=i+1;
            % end
        end
        if (en(1,2)<=maximo(2))%%&&(en(1,2)>minimo(2))
            e(posicion(2),:)=en(1,:);
            y(:,:,posicion(2))=yn(:,:,1);
        end
        % if (en(l+1,2)<maximo(2,2))%%&&(en(l,2)>minimo(2))
        % e(posicion(2),:)=en(l+1,:);
        % y(:,:,posicion(2))=yn(:,:,l+1);
        % end
    end
end
end

N=length(C)^2;
for k=1:pob, %evaluacion de la funcion obj para cada uno de los elem de
la pob
    e(k,:)=Jo(y(:,:,k), T,F,C,R); %x=conj de parametros, p=%estimar
    %e(k,1)=e(k,1)-100*(N-e(k,4))/N;
    e(k,2)=e(k,2)-100*(N-e(k,4));
end
ilmin=find(e(:,1)==min(e(:,1))); % indice de los mininos en las
estaciones
i2min=find(e(ilmin,2)==min(e(ilmin,2)));
pos=ilmin(i2min);
% minimo=e(1,:);
% %minimo(1)=minimo(1)+N-minimo(4);
% pos=1;
% for i=2:pob, % busca el indice donde esta el min de la fun objetivo
% % if ((e(i,1)+N-e(i,4))-(minimo(1)+N-
minimo(4))<=4)&&(e(i,2)<minimo(2)))
% if ((abs(e(i,1)-minimo(1))<=2)&&(e(i,2)<=minimo(2)))
% minimo=e(i,:);
% pos=i;
% end
% end

function e=Jo(y,T,F,C,R)

```

```

%e=zeros(1,1);
N=length(R(:,1));
%%mt=y.*T;
%mf=y.*F;
nE=sum(sum(y)); % # de estaciones
sT=sum(sum(T));%suma de los tiempos en la red
sF=sum(sum(F));%suma de los flujos en la red
[r c]=size(T);
ne=0;
st=0;
sf=0;
for i=1:r
    for j=1:c
        if (y(i,j)==1)&&(y(j,i)==1)
            sf=sf+sF;
            st=st+sT;
            ne=ne+nE;
        else
            st=st+y(i,j)*T(i,j);
            sf=sf+y(i,j)*F(i,j);
            ne=ne+y(i,j);
        end
    end
end
cent=zeros(1,2);
nrc=0; %num de rutas cubiertas
for nr=1:N % recorre todas las rutas
    ruta=find(R(nr,:)>0);
    cent(1)=length(find(C==R(nr,1)));
    cent(2)=length(find(C==R(nr,length(ruta))));
    if cent(:)>0
        i=1;
        est=0; %numero de estaciones en la ruta nr
        while R(nr,i+1)~=0
            if (y(R(nr,i),R(nr,i+1))==1) || (y(R(nr,i+1),R(nr,i))==1)
                est=est+1;%sf=sf+F(R(nr,i),R(nr,i+1));
            end
            i=i+1;
            if i==c
                break;
            end
        end
        if est>=1
            nrc=nrc+1;
        end
    end
end
%ne=ne+100*(N-nrc)/N;
N=length(C)^2;
st=st+100*(N-nrc);
e=[ne st sf nrc];

```

B ARTÍCULOS PUBLICADOS