



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---

**POSGRADO EN INGENIERÍA  
INSTITUTO DE INGENIERÍA DE LA UNAM**

**ANÁLISIS DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN DE  
GASOLINAS EN EL DISTRITO FEDERAL**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA  
SISTEMAS - INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PRESENTA:**

**LUIS ALFREDO MACÍAS VILCHIS**

**DIRECTORA DE TESIS:**

**DRA. ANGÉLICA LOZANO CUEVAS**

**MÉXICO DF A 1 DE JULIO DEL 2008**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente : Dr. Aceves García Ricardo

Secretario : Dra. Elizondo Cortes Mayra

Vocal : Dra. Lozano Cuevas Angélica del Rocío

1<sup>er.</sup> Suplente : Dra. Balderas Cañas Patricia

2<sup>do.</sup> Suplente : Dr. Estrada Medina Juan Manuel

Lugar donde se realizó la tesis:

Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales (LTST) del Instituto de Ingeniería  
UNAM

**TUTOR DE TESIS:**

**Dra. Lozano Cuevas Angélica del Rocío**

---

**FIRMA**

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo se realizó en el Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales (LTST) bajo la dirección de la **Dra. Angélica Lozano Cuevas**, a quien agradezco infinitamente sus consejos, apoyo total, y orientación en torno al trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México el privilegio de ser su alumno

Al Consejo Nacional de Ciencia Tecnología por el apoyo proporcionado para realizar los estudios de maestría.

A mis padres y a mi hermano por su amor, confianza y apoyo. Gracias a mi papá por enseñarme desear ser mejor. Gracias a mi mamá por velar por mi, y estimularme a alcanzar mis metas. Gracias a mi hermano por su ejemplo y amor.

A la familia Villegas Cárdenas por todo su amor y por permitirme formar parte de su gran familia.

A mi novia Ariadna por su amor y cariño

A mis amigos, en especial a Luis y a Sara por su gran amistad, apoyos y comentarios.

A todos mis maestros, en especial a Mayra Elizondo les agradezco todo su tiempo, dedicación, esfuerzo y pasión por la enseñanza.

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>5</b>
<b>DISTRIBUCIÓN DE GASOLINA EN EL DISTRITO FEDERAL</b> .....	<b>5</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	5
1.2 MATERIALES PELIGROSOS.....	5
1.2.1 <i>Introducción</i> .....	5
1.2.2 <i>Definiciones</i> .....	5
1.2.3 <i>Clasificación de las sustancias peligrosas</i> .....	6
1.2.4 <i>Clasificación de la gasolina</i> .....	11
1.3 RIESGOS POTENCIALES DE LA GASOLINA .....	12
1.3.1 <i>Componentes de la gasolina</i> .....	12
1.3.2 <i>Peligro de fuego</i> .....	12
1.3.3 <i>Peligro de explosión</i> .....	12
1.3.4 <i>Peligros especiales</i> .....	12
1.3.5 <i>Evacuación en caso de accidente</i> .....	13
1.4 LAS GASOLINAS EN MÉXICO .....	13
1.4.1 <i>Introducción</i> .....	13
1.4.2 <i>Organismos subsidiarios</i> .....	14
1.4.3 <i>Historia de la gasolina en México</i> .....	15
1.5 PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE GASOLINAS.....	17
1.5.1 <i>La distribución de gasolinas en el Distrito Federal</i> .....	20
1.5.2 <i>Ubicación de las estaciones de servicio en el DF</i> .....	22
1.6 PROBLEMÁTICA.....	24
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>27</b>
<b>EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE</b> .....	<b>27</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	27
2.2 PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE.....	27
2.2.1 <i>Definiciones de Redes</i> .....	27
2.2.2 <i>El Problema de Transporte o de Hithcock</i> .....	27
2.2.3 <i>Modelo de Asignación</i> .....	31
2.2.4 <i>Modelo de Transbordo</i> .....	32
2.2.5 <i>PROBLEMA DE RUTA MÍNIMA</i> .....	32
2.2.6 <i>Problema de Rutas de Vehículos</i> .....	33
2.2.7 <i>El Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Capacidad</i> .....	35
2.2.8 <i>El problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo</i> .....	36
2.2.9 <i>El Problema de Rutas de Vehículos con Viajes Múltiples</i> .....	37
2.2.10 <i>El Problema de Rutas de Vehículos con Flota de Vehículos Heterogénea</i> .....	39
2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA .....	40
2.3.1 <i>Introducción</i> .....	40
2.3.2 <i>Valor de la Información</i> .....	40
2.3.3 <i>Visualización de los Datos</i> .....	41
2.3.4 <i>Definición de los SIG</i> .....	41
2.3.5 <i>Componentes de un SIG</i> .....	42
2.3.6 <i>Tipos de Datos de Los SIG</i> .....	43
2.3.7 <i>Disciplinas Relacionadas</i> .....	46
2.4 LOS SIG PARA EL TRANSPORTE.....	47
2.4.1 <i>Análisis y Modelado de los SIG-T</i> .....	47
2.4.2 <i>TransCAD©</i> .....	47
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>51</b>
<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>51</b>

3.1 INTRODUCCIÓN .....	51
3.2 ZONA DE ESTUDIO .....	51
3.2.1 Descripción de la Zona de Estudio.....	52
3.3 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS .....	52
3.3.1 Capas de Información.....	52
3.3.2 Oferta.....	56
3.3.3 Demanda.....	56
3.4 DETERMINACIÓN DE RUTAS .....	57
3.4.1 Modelo de Rutas de Vehículos Seleccionado.....	57
3.4.2 Cálculo de Población Expuesta.....	57
3.4.3 Aplicación en TransCAD.....	58
3.4.4 Adaptación del modelo VRP al transporte de sustancias peligrosas.....	60
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>63</b>
<b>POBLACIÓN EXPUESTA EN CASO DE UN INCIDENTE .....</b>	<b>63</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	63
4.2 SIMULACIÓN DE UN ACCIDENTE EN LOS DESTINOS.....	63
4.2.1 En caso de Derrame .....	63
4.2.2 En caso de Incendio.....	65
4.3 SIMULACIÓN DE UN ACCIDENTE EN ALGUNA VIALIDAD .....	66
4.3.1 En caso de Derrame .....	66
4.3.1 En caso de Incendio.....	66
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>69</b>
<b>ANÁLISIS DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN .....</b>	<b>69</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	69
5.2 RUTAS ACTUALES DE DISTRIBUCIÓN .....	69
5.2.1 Principales Avenidas Utilizadas .....	70
5.2.2 Población Expuesta en las Rutas Actuales .....	71
5.2.3 Principales Problemas Encontrados .....	73
5.3 PROPUESTA 1, RUTAS CON POBLACIÓN EXPUESTA MÍNIMA .....	73
5.3.1 Principales Avenidas Utilizadas.....	74
5.3.2 Población Expuesta en la Propuesta 1 .....	75
5.3.3 Análisis del Sistema de Rutas de la Propuesta 1 .....	77
5.3.4 Principales Problemas Encontrados .....	78
5.4 PROPUESTA 2, RUTAS CON MINIMIZACIÓN DE LA PONDERACIÓN DE LA DISTANCIA Y LA POBLACIÓN EXPUESTA.....	78
5.4.1 Principales Avenidas Utilizadas .....	79
5.4.2 Población Expuesta en la Propuesta 2 .....	80
5.4.3 Análisis del Sistema de Rutas de la Propuesta 2 .....	82
5.4.4 Principales Problemas Encontrados .....	83
5.5 COMPARACIÓN DE RUTAS .....	83
5.5.1 Población Expuesta (50 metros).....	84
5.5.2 Población Expuesta (800 metros).....	84
5.5.3 Distancia Recorrida.....	85
5.5.4 Misma Población Expuesta (50 metros).....	85
5.5.5 Misma Población Expuesta (800 metros).....	86
5.5.6 Población Expuesta (50 metros) por Kilómetro Recorrido .....	86
5.5.7 Población Expuesta (800 metros) por Kilómetro Recorrido .....	87
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>89</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>93</b>

---

## INTRODUCCIÓN

El transporte es una actividad fundamental para el alcance y desarrollo socioeconómico de las sociedades modernas. Sin embargo, esta actividad puede involucrar efectos negativos como la generación de accidentes. La magnitud de un accidente puede ser mayor, si el transporte involucra alguna sustancia que esté dotada de propiedades peligrosas que puedan representar consecuencias adversas para el ambiente ó para las personas a las que se expone. En este sentido una de las actividades que requiere atención especial dentro de la planeación y prevención de accidentes en el transporte, es el transporte de sustancias peligrosas.

El reto del transporte de sustancias peligrosas consiste en realizar el envío de mercancías no sólo de manera eficiente sino también de manera segura, para que en caso de que ocurra un accidente, se afecte a la menor población posible. El problema es que en ocasiones el transporte de sustancias peligrosas, se realiza sin tomar en cuenta el peligro que representa para la población. Generalmente las rutas elegidas por los conductores y compañías son aquellas que buscan reducir el costo o tiempo de transporte y no las que priorizan la seguridad de la población, por lo que es importante encontrar un punto de equilibrio entre los costos del transporte y la población expuesta en caso de accidente. Si las rutas más seguras representan costos inalcanzables para las compañías, se seguirán utilizando las rutas más económicas; por el otro lado, si las rutas más económicas representan la exposición de una población mayor, se seguirá exponiendo (y afectando en caso de accidente) a la población.

El objetivo de este trabajo es determinar rutas alternas para el transporte de gasolinas en el Distrito Federal, que reduzcan la población expuesta y además consideren los costos de transporte, con el fin de que puedan ser realmente implementadas. La distribución de gasolina es analizada mediante el uso de un Sistema de Información Geográfica para el Transporte (SIG-T) y la adaptación de un modelo para el “Problema de Rutas de Vehículos (VRP)”. Dos nuevas propuestas de rutas, alternativas a las rutas actuales de distribución de gasolinas en el Distrito Federal, fueron generadas y analizadas. La primera considera un conjunto de rutas que reducen tanto como es posible la población expuesta, mientras que la segunda, considera un conjunto de rutas que minimizan una ponderación entre la población expuesta y la distancia recorrida.

El análisis de estos dos conjuntos de rutas, darán respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Es posible encontrar rutas alternas cuando las distancias entre orígenes y destinos son relativamente cortas, como sucede dentro de zonas urbanas?
- ¿Cuántas personas tendrían que ser evacuadas (de acuerdo a los lineamientos oficiales), en caso de un accidente en la vía pública, que involucre un autotanque cargado de gasolina?
- ¿Cuál es la población expuesta con las rutas actuales de distribución de gasolinas (con costo mínimo)?
- ¿Es posible encontrar rutas alternas para la distribución de gasolinas en el Distrito Federal, que puedan reducir la población expuesta y no incrementar demasiado los costos de transporte?

El desarrollo de este estudio se organiza de la siguiente manera:

En el primer capítulo se presenta una introducción sobre los materiales peligros, la clasificación de éstos en cuanto a su riesgo, los riesgos potenciales de la gasolina durante su transporte, y el proceso de distribución de gasolinas en México.

En el segundo capítulo se presentan los principales modelos para problemas de transporte de mercancías, incluyendo su formulación y algoritmos más utilizados. Entre éstos, se hace especial énfasis en el “Problema de Rutas de Vehículos”, seleccionado para la determinación de rutas (capítulo 5). Además se describen los sistemas de información geográfica, así como sus componentes y aplicaciones en el transporte, y se describen las principales características del SIG-T seleccionado, TransCAD©.

En el tercer capítulo se describe la zona de estudio seleccionada, sus características, cómo se integra la información dentro del SIG-T y la metodología que se emplea en este estudio.

En el cuarto capítulo se simula un accidente en varios puntos utilizados por las rutas actuales, así como en los destinos, con la finalidad de determinar la población que sería afectada (población que tendría que ser evacuada) en caso de un derrame ó en caso de un incendio que involucre un autotank que transporte gasolina.

En el quinto capítulo se analizan las rutas de distribución actuales, las cuales se comparan con las rutas propuestas. Para cada conjunto de rutas se describen, las principales avenidas utilizadas, la población expuesta y los principales problemas encontrados.

Finalmente se presentan las conclusiones y las referencias, además de un Anexo que contiene los resultados que del programa TransCAD©, en el cálculo de distancias recorrida y población expuesta de todas las rutas.

## **RESUMEN**

El problema de transporte de sustancias peligrosas ha tomado mayor importancia en los últimos años debido al incremento en el volumen de las sustancias transportadas, en líneas generales se puede decir que existen dos principales grupos de investigación: la evaluación del riesgo y la determinación de rutas para el transporte de sustancias peligrosas. La evaluación del riesgo consiste en la valoración probabilística de una serie de factores que podrían contribuir a que un accidente ocurra. La determinación de rutas para el transporte, consiste en la aplicación de modelos matemáticos que pueden llevar a la determinación de rutas alternas más seguras para la población expuesta, con respecto a las que usualmente son tomadas por los transportistas o determinadas por las compañías.

El objetivo de este trabajo es determinar rutas alternas para el transporte de gasolinas en el Distrito Federal que reduzcan la población expuesta y los costos de transportes. Se utiliza un Sistema de Información Geográfica para el Transporte (SIG-T) y un modelo de Problemas de Rutas de Vehículos (VRP) para analizar la distribución de gasolinas. Se simulan las rutas actuales de distribución y se presentan dos nuevas propuestas. La primera determina el conjunto de rutas que minimizan tanto como sea posible la población expuesta. Y la segunda que determina el conjunto de rutas que minimizan una ponderación entre la población expuesta y la distancia recorrida. Los resultados de ambas propuestas han sido analizados y comparados con las rutas actuales y se encontró que sí es posible determinar rutas alternas de distribución que reducen la población expuesta al peligro, sin incurrir en grandes incrementos de la distancia recorrida.

## **ABSTRACT**

The hazardous material transportation problem has recently been gaining more prominence in spite of the increasing transported volume. In general the research can be divided in two main streams: the risk assessment for the transport of hazardous materials and the methods of routing for the hazardous material transportation problem. The risk assessment consists of evaluating the probability of the different factors that can lead to an accident happen. The routing for the hazardous materials consists of using mathematical procedures to obtain safer routes and to expose less population than those commonly chosen by drivers and companies.

The objective of this study is to obtain different routes for gasoline transportation in the Distrito Federal which reduces the exposed population and it also reduces the traveled distance. A Geographic Information System for Transport (SIG-T) and a Vehicle Routing Problem (VRP) are used to analyze the gasoline distribution. The current routes are simulated and two new proposals are shown in this work. The first one has a target which significantly reduces the possible risks of the exposed population. The second considers the pondered target of the traveled distance and the exposed population size. The results of both proposals have been analyzed and compared with the current routes. These results prove that it is possible to obtain different routes which reduce the exposed population without increasing the traveled distance significantly.

---

## CAPÍTULO 1

### DISTRIBUCIÓN DE GASOLINA EN EL DISTRITO FEDERAL

#### 1.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es presentar una introducción sobre los materiales peligrosos, clasificarlos de acuerdo al riesgo que representan durante su transportación, identificar a la gasolina como un material peligroso, describir cuáles son los riesgos inherentes del transporte terrestre, explicar cómo se realiza la distribución de gasolinas en México, identificando los tipos de transporte involucrados a lo largo de la cadena de suministro a nivel nacional y por último explicar la cadena de suministro a nivel Distrito Federal.

#### 1.2 MATERIALES PELIGROSOS

##### 1.2.1 Introducción

Las sustancias químicas que se encuentran en el comercio en México contribuyen de manera significativa al desarrollo del país en la medida que son la base de una gran variedad de procesos productivos, permiten el combate a las plagas, satisfacen necesidades domésticas, hacen posible la fabricación de una gran variedad de bienes y son empleadas en multitud de aplicaciones, todo lo cual se traduce en negocios, empleos, ingresos y bienestar social. Sin embargo, la producción/extracción, transformación, importación, almacenamiento, transporte, comercialización, aplicación y disposición final de algunas de estas sustancias, si están dotadas de propiedades peligrosas, pueden tener consecuencias adversas para la salud y el ambiente, si su manejo se realiza de manera irracional y en condiciones que conllevan exposiciones excesivas a ellas. Históricamente, poco se había realizado en el control de las sustancias peligrosas, la industria no le daba la debida atención o importancia a los impactos potenciales sobre el ambiente producido por estas sustancias. El manejo y transporte de éstas, se realizaba sin las medidas necesarias de seguridad e higiene.

De alguna manera, en nuestro país, se ha logrado visualizar el problema que estas sustancias representan y se ha trabajado para implementar normas y restricciones legales que ayuden a detener y controlar esta gran problemática.

##### 1.2.2 Definiciones

El reglamento para el transporte de materiales y residuos peligrosos (SCT, 2007), en su título primero, capítulo 1, artículo 2, define:

**Material peligroso.**- Aquellas sustancias peligrosas, sus remanentes, sus envases, embalajes y demás componentes que conformen la carga que será transportada por las unidades.

**Residuo peligroso.**- Son aquellos que posean alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio. Su eliminación o confinamiento y control están sujetos a normatividad de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

**Sustancia peligrosa.**- Todo aquel elemento, compuesto, material o mezcla de ellos que independientemente de su estado físico, represente un riesgo potencial para la salud, el ambiente, la

---

seguridad de los usuarios y la propiedad de terceros; también se consideran bajo esta definición los agentes biológicos causantes de enfermedades.

### 1.2.3 Clasificación de las sustancias peligrosas

El reglamento para el transporte de materiales y residuos peligrosos (SCT, 2007), en el artículo 7° clasifica a las sustancias peligrosas de acuerdo con sus características de riesgo, en 9 clases:

Clase 1: Explosivos

Clase 2: Gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión

Clase 3: Líquidos inflamables

Clase 4: Sólidos inflamables

Clase 5: Oxidantes y peróxidos orgánicos

Clase 6: Tóxicos agudos (venenos) y agentes infecciosos.

Clase 7: Radiactivos

Clase 8: Corrosivos

Clase 9: Varios

#### 1.2.3.1 Los explosivos o Clase 1

Dependiendo el tipo de riesgo la clase 1 comprende 6 divisiones que son:

1.1 Sustancias y objetos que representan un riesgo de explosión de la totalidad de la masa, es decir que la explosión se extiende de manera prácticamente instantánea a casi toda la carga (Ver fig. 1.1)

1.2 Sustancias y objetos que representan un riesgo de proyección pero no un riesgo de explosión de la totalidad de la masa (Ver fig. 1.1)

1.3 Sustancias y objetos que representan un riesgo de incendio y de que se produzcan pequeños efectos de onda expansiva, de proyección o ambos, pero no riesgo de explosión de la totalidad de la masa (Ver fig. 1.1). Se incluyen en esta división las sustancias y objetos siguientes:

a) Aquellos cuya combustión da lugar a una radiación térmica considerable.

b) Aquellos que arden sucesivamente con pequeños efectos de onda expansiva, de proyección, o ambos.



Figura 1.1 Identificación para el transporte de explosivos clase 1.1, 1.2 y 1.3  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

1.4 Sustancias y objetos que no representan un riesgo considerable (Ver fig. 1.2)



Figura 1.2 Identificación para el transporte de explosivos clase 1.4  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

1.5 Substancias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión de la totalidad de la masa, pero que es muy improbable su iniciación o transición de incendio o detonación bajo condiciones normales de transporte (Ver fig. 1.3)



Figura 1.3 Identificación para el transporte de explosivos clase 1.5  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

1.6 Objetos extremadamente insensibles que no presentan un riesgo de explosión a toda la masa, que contienen sólo substancias extremadamente insensibles a la detonación y muestran una probabilidad muy escasa de iniciación y propagación accidental (Ver fig. 1.4)



Figura 1.4 Identificación para el transporte de explosivos clase 1.6  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

### 1.2.3.2 La Clase 2 que comprende gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión

Para las condiciones de transporte las substancias de Clase 2 se clasifican de acuerdo al tipo de riesgo, la Clase 2 se divide en:

2.1 Gases inflamables: (Ver fig. 1.5) Substancias que a 20°C y una presión normal de 101.3 kPa.: Arden cuando se encuentran en una mezcla de 13% o menos por volumen de aire o tienen un rango de inflamabilidad con aire de cuando menos 12% sin importar el límite inferior de inflamabilidad.



Figura 1.5 Identificación para el transporte de gases inflamables clase 2.1  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

2.2 Gases no inflamables, no tóxicos: (Ver fig. 1.6) Gases que son transportados a una presión no menor de 280 kPa. a 20°C, o como líquido refrigerados y que:

- Son asfixiantes. Gases que diluyen o reemplazan al oxígeno presente normalmente en la atmósfera; o
- Son oxidantes. Gases que pueden, generalmente por ceder oxígeno, causar o contribuir, más que el aire, a la combustión de otro material.
- No caben en los anteriores.



Figura 1.6 Identificación para el transporte de gases no inflamables clase 2.2  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

### 2.3 Gases tóxicos (Ver fig. 1.7)

Gases que:

- Se conoce que son tóxicos o corrosivos para los seres humanos por lo que constituyen un riesgo para la salud; o
- Se supone que son tóxicos o corrosivos para los seres humanos porque tienen un  $CI_{50}$  igual o menor que 5000 Mol/M<sup>3</sup> (ppm).



Figura 1.7 Identificación para el transporte de gases tóxicos 2.3  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

#### 1.2.3.3 La clase 3 o líquidos inflamables

Son mezclas o líquidos que contienen sustancias sólidas en solución o suspensión, que despiden vapores inflamables a una temperatura no superior a 60.5°C en los ensayos en copa cerrada o no superiores a 65.6°C en copa abierta. Las sustancias de esta clase son:

Líquidos que presenten un punto de ebullición inicial igual o menor de 35°C.

Líquidos que presentan un punto de inflamación (en copa cerrada) menor de 23°C y un punto inicial de ebullición mayor de 35°C.

Líquidos que presentan un punto de inflamación (en copa cerrada) mayor o igual 23°C, menor o igual de 60.5°C y un punto inicial de ebullición mayor a 35°C (Ver fig. 1.8)



Figura 1.8 Identificación para el transporte de líquidos inflamables clase 3  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

#### 1.2.3.4 La clase 4, sólidos inflamables

Son sustancias que presentan riesgo de combustión espontánea, así como aquellos que en contacto con el agua desprenden gases inflamables de acuerdo al tipo de riesgo se dividen en:

4.1 Sólidos inflamables (Ver fig. 1.9)

Substancias sólidas que no están comprendidas entre las clasificadas como explosivas pero que, en virtud de las condiciones que se dan durante el transporte, se inflaman con facilidad o pueden provocar o activar incendios por fricción.



Figura 1.9 Identificación para el transporte de sólidos inflamables clase 4.1  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

4.2 Substancias que presentan un riesgo de combustión espontánea (Ver fig. 1.10)  
Substancias que pueden calentarse espontáneamente en las condiciones normales de transporte o al entrar en contacto con el aire y que entonces puedan inflamarse.



Figura 1.10 Identificación para el transporte de sólidos inflamables clase 4.2  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

4.3 Substancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables (Ver fig. 1.11)  
Substancias que por reacción con el agua pueden hacerse espontáneamente inflamables o desprender gases inflamables en cantidades peligrosas.



Figura 1.11 Identificación para el transporte de sólidos inflamables clase 4.3  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

#### 1.2.3.5 La clase 5, oxidantes y peróxidos orgánicos

Son substancias que se definen y dividen tomando en consideración su riesgo se dividen en:

5.1 Substancias oxidantes. Substancias que sin ser necesariamente combustibles, pueden, generalmente liberando oxígeno, causar o facilitar la combustión de otras (Ver fig. 1.12)



Figura 1.12 Identificación para el transporte de oxidantes clase 5.1  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

---

5.2 Peróxidos orgánicos: (Ver fig. 1.13) Sustancias orgánicas que contienen la estructura bivalente -O-O y pueden considerarse derivados del peróxido de hidrógeno, o ambos, han sido sustituidos por radicales orgánicos. Los peróxidos son sustancias térmicamente inestables que pueden sufrir una descomposición exotérmica auto acelerada. Además, pueden tener una o varias de las propiedades siguientes:

- a) Ser susceptibles de una descomposición explosiva;
- b) Arder rápidamente;
- c) Ser sensibles a los impactos o a la fricción;
- d) Reaccionar peligrosamente al entrar en contacto con otras sustancias;
- e) Causar daños a la vista.



Figura 1.13 Identificación para el transporte de oxidantes clase 5.2  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

#### 1.2.3.6 La clase 6, tóxicos agudos (venenos) y agentes infecciosos

Son sustancias que se definen y dividen, tomando en consideración su riesgo se dividen en:

6.1 Tóxicos agudos (venenos): Son aquellas sustancias que pueden causar la muerte, lesiones graves o ser nocivas para la salud humana si se ingieren, inhalan o entran en contacto con la piel. Los gases tóxicos (venenos) comprimidos pueden incluirse en la clase "Gases"(Ver fig. 1.14)



Figura 1.14 Identificación para el transporte de venenos clase 6.1  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

6.2 Agentes infecciosos: Son las que contienen microorganismos viables incluyendo bacterias, virus, parásitos, hongos, o una combinación híbrida o mutante; que son conocidos o se cree que pueden provocar enfermedades en el hombre o los animales (Ver fig. 1.15)



Figura 1.15 Identificación para el transporte de líquidos venenos clase 6.2  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

### 1.2.3.7 Clase 7 radiactivos

Para los efectos de transporte, son todos los materiales cuya actividad específica es superior a 70 kBq/kg (2 nCi/g) (Ver fig. 1.16)



Figura 1.16 Identificación para el transporte de radiactivos clase 7  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

### 1.2.3.8 Clase 8 corrosivos

Son sustancias líquidas o sólidas que por su acción química causan lesiones graves a los tejidos vivos con los que entra en contacto o que si se produce un escape pueden causar daños e incluso la destrucción de otras mercancías o de las unidades en las que son transportadas (Ver fig. 1.17)



Figura 1.17 Identificación para el transporte de corrosivos clase 8  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

### 1.2.3.9 Clase 9 varios

Son aquellas sustancias que durante el transporte presentan un riesgo distinto de los correspondientes a las demás clases y que también requieren un manejo especial para su transporte, por representar un riesgo potencial para la salud, el ambiente, la seguridad a los usuarios y la propiedad a terceros (Ver fig. 1.18)



Figura 1.18 Identificación para el transporte de varios clase 9  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

## 1.2.4 Clasificación de la gasolina

La gasolina se clasifica dentro de la clase 3, líquidos inflamables, cuenta con el número de identificación internacional de materiales peligrosos de la ONU 1203 de acuerdo con la norma oficial mexicana NOM-004-SCT/2000 el vehículo que la transporte deberá portar la identificación de la figura 1.19.



Figura 1.19 Identificación para el transporte de la gasolina  
Fuente: Pemex Subdirección de auditoría en seguridad industrial y protección ambiental

## 1.3 RIESGOS POTENCIALES DE LA GASOLINA

### 1.3.1 Componentes de la gasolina

La gasolina es una mezcla de hidrocarburos parafínicos de cadena recta y ramificada, olefinas, cicloparafinas y aromáticos, que se obtienen del petróleo. Puede contener aditivos con varios componentes que cumplen con una función específica (desemulsión, detergencia, octanaje, corrosión, etc) (Pemex, 2006).

### 1.3.2 Peligro de fuego

La gasolina tiene un punto de encendido muy bajo: el uso de rocío de agua cuando se combate el fuego, puede ser ineficaz. Para mezclas con un contenido alto de alcohol o solvente polar, la espuma resistente al alcohol puede ser más efectiva.

#### 1.3.2.1 Incendios pequeños

Para incendios pequeños se puede utilizar: Polvos químicos secos, CO<sub>2</sub>, rocío de agua o espuma regular.

#### 1.3.2.2 Incendios grandes

En incendios grandes se puede utilizar el rocío de agua, niebla o espuma regular.

#### 1.3.2.3 Incendio que involucra tanques

Cuando el incendio involucra tanques o autotanques, se debe combatir desde una distancia máxima, utilizando soportes fijos para mangueras o chiflones reguladores.

Los contenedores deben ser enfriados con chorros de agua hasta mucho después de que el fuego se haya extinguido. Si el incendio es masivo se debe evacuar y dejar que arda.

### 1.3.3 Peligro de explosión

La gasolina es altamente inflamable bajo ciertas condiciones puede producirse una explosión. Se puede incendiar fácilmente por calor, chispas o llamas, los vapores pueden formar mezclas explosivas con el aire, pueden viajar a una fuente de encendido y regresar en llamas. La mayoría de los vapores son más pesados que el aire, éstos se dispersarán a lo largo del suelo y se juntarán en las áreas bajas o confinadas. La explosión de vapor se puede dar en interiores, exteriores o en alcantarillas.

### 1.3.4 Peligros especiales

La gasolina es un líquido extremadamente inflamable, puede incendiarse fácilmente a temperatura normal, sus vapores son más pesados que el aire por lo que se dispersarán por el suelo y se concentrarán en las zonas bajas. Esta sustancia puede almacenar cargas electrostáticas debidas al flujo

o movimiento del líquido. Los vapores de gasolina acumulados y no controlados que alcancen una fuente de ignición, pueden provocar una explosión.

El trapo y materiales similares contaminados con gasolina y almacenados en espacios cerrados, pueden sufrir combustión espontánea.

### 1.3.5 Evacuación en caso de accidente

#### 1.3.5.1 En caso de derrame

En caso de ocurrir una fuga o derrame se debe aislar inmediatamente un área de por lo menos 50 metros a la redonda. La evacuación se realizará a favor del viento 300 metros (Ver fig. 1.20)

#### 1.3.5.2 En caso de incendio

En caso de incendio que involucre a un tanque, carro de ferrocarril o auto tanque se deberá aislar y evacuar 800 metros a la redonda.

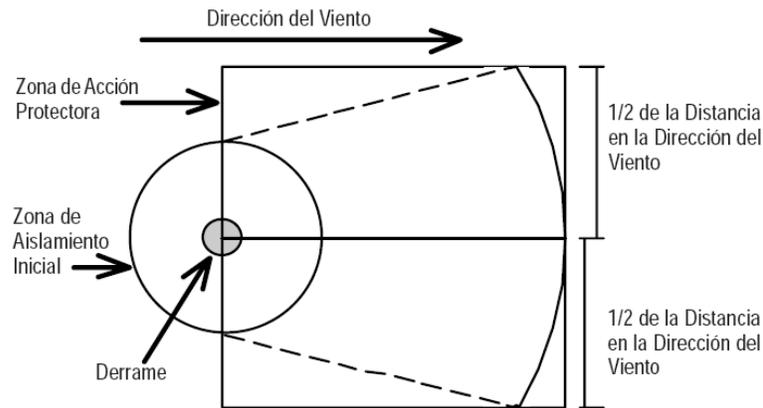


Figura 1.20 Zona de acción protectora en caso de fuga o derrame  
Fuente: Guía de respuesta en caso de emergencia (US DOT, 2004)

## 1.4 LAS GASOLINAS EN MÉXICO

### 1.4.1 Introducción

Petróleos Mexicanos fue creado por Decreto Ley el 7 de junio de 1938 como un organismo descentralizado, con personalidad jurídica y patrimonio propios, con domicilio en la Ciudad de México, Distrito Federal, y con el objetivo de ejercer la conducción central y la dirección estratégica de todas las actividades que abarca la industria petrolera estatal en los términos del Artículo 27 Constitucional. La legislación mexicana señala que en materia de hidrocarburos:

“El Estado realizará las actividades que le corresponden en exclusiva en las áreas estratégicas del petróleo, demás hidrocarburos y petroquímica básica, por conducto de Petróleos Mexicanos y de los organismos descentralizados subsidiarios”

Su misión es maximizar la renta petrolera, contribuir al desarrollo nacional y satisfacer con calidad las necesidades de sus clientes, en armonía con la comunidad y el medio ambiente.

Pemex es una empresa integrada, que realiza actividades de exploración, producción de hidrocarburos y su transformación. Asimismo, comercializa en los mercados interno y externo petróleo crudo y gas natural; así como productos refinados, gas licuado del petróleo y petroquímicos.

Pemex tiene el compromiso de producir hidrocarburos y sus derivados, transportarlos y comercializarlos, tanto en el mercado nacional como internacional, así como proporcionar los servicios relacionados con su actividad en forma segura, eficaz y apegada al marco normativo, con respeto al medio ambiente.

---

## **1.4.2 Organismos subsidiarios**

La conducción central y la dirección estratégica de la empresa están a cargo del corporativo Pemex que es responsable de asegurar la integridad y unidad de acción de la misma. Pemex está dividida en organismos subsidiarios con las siguientes funciones ([www.pemex.com.mx](http://www.pemex.com.mx)):

### **1.4.2.1 Pemex Exploración y Producción**

La misión de Pemex Exploración y Producción (PEP) es maximizar el valor económico a largo plazo de las reservas de crudo y gas natural del país, garantizar la seguridad de sus instalaciones y su personal. Sus actividades principales son la exploración y explotación del petróleo y el gas natural; su transporte, almacenamiento en terminales y su comercialización de primera mano; éstas se realizan en cuatro regiones geográficas que abarcan la totalidad del territorio mexicano: Norte, Sur, Marina Noreste y Marina Suroeste.

PEP a nivel mundial ocupa el tercer lugar en términos de producción de crudo, el primero en producción de hidrocarburos costa fuera, el noveno en reservas de crudo y el doceavo en ingresos.

### **1.4.2.2 Pemex Gas y Petroquímica Básica**

Dentro de la cadena del petróleo, Pemex Gas y Petroquímica Básica ocupa una posición estratégica tiene la responsabilidad del procesamiento del gas natural y sus líquidos, así como del transporte, comercialización y almacenamiento de sus productos.

En el ámbito internacional, Pemex Gas y Petroquímica Básica es una de las principales empresas procesadoras de gas natural, con un volumen procesado cercano a 4 mil millones de pies cúbicos diarios (mmpcd) durante el 2004, y la segunda empresa productora de líquidos, con una producción de 451 mil barriles diarios (mbd) en los 11 Centros Procesadores de Gas a cargo del Organismo. Cuenta con una red de gasoductos, superior a 12 mil kilómetros, a través de la cual se transportan más de 3,600 mmpcd de gas natural, lo que la ubica en el décimo lugar entre las principales empresas transportistas de este energético en Norteamérica.

### **1.4.2.3 Pemex Petroquímica**

Pemex Petroquímica que elabora, comercializa y distribuye productos para satisfacer la demanda del mercado a través de sus empresas filiales y centros de trabajo. Su actividad fundamental son los procesos petroquímicos no básicos derivados de la primera transformación del gas natural, metano, etano, propano y naftas de Petróleos Mexicanos. Pemex Petroquímica guarda una estrecha relación comercial con empresas privadas nacionales dedicadas a la elaboración de fertilizantes, plásticos, fibras y hules sintéticos, fármacos, refrigerantes, aditivos, etc.

### **1.4.2.4 Pemex comercio internacional**

Pemex comercio internacional (PMI) es el brazo comercial de Pemex en el mercado internacional. Realiza operaciones en todo el mundo, PMI maneja las importaciones y exportaciones de crudo y derivados de Pemex, abasteciendo diversos mercados alrededor del mundo.

### **1.4.2.5 Pemex Refinación**

Las funciones de Pemex Refinación son los procesos industriales de refinación, elaboración de productos petrolíferos y derivados del petróleo, su distribución, almacenamiento y venta de primera mano. La Subdirección Comercial de Pemex Refinación realiza la planeación, administración y control de la red comercial, así como la suscripción de contratos con inversionistas privados mexicanos para el establecimiento y operación de las Estaciones de Servicio integrantes de la Franquicia Pemex para atender el mercado al menudeo de combustibles automotrices (gasolinas y diesel).

### 1.4.3 Historia de la gasolina en México

La calidad de los productos derivados del petróleo (en particular de la gasolina y el diesel) han evolucionado en sus requerimientos, en función del desarrollo tecnológico de los vehículos y de la normatividad en materia de emisiones resultante de la combustión de los energéticos en los motores.

El binomio energía-medio ambiente es el problema actual en el mundo y su solución demanda de una acción coordinada entre la calidad de los combustibles y las tecnologías de los equipos en donde se emplean, a fin de obtener como resultado final menores emisiones por unidad de energético consumida.

En el caso particular de las gasolinas, su uso masivo da inicio en la época de los treinta con el desarrollo del automóvil. En esos tiempos los requerimientos de calidad de estos productos era mínima, situación derivada del incipiente desarrollo tecnológico de la industria de refinación y automotriz, así como de la inexistencia de regulaciones en materia de emisiones vehiculares.

En la época de los años 30's las exigencias de calidad de la gasolina eran mínimas; básicamente se producía un combustible por destilación del crudo que resultaba de muy bajo octano (del orden de 57), medido con base en el procedimiento del método de investigación (Research Octane Number RON). En el caso de México, se le identificaba con el nombre de Gasolina.

En los años 40's la industria automotriz desarrolló motores de mayor relación de compresión, los cuales demandaban de una gasolina de mayor octanaje, así en esas épocas nace en México el producto identificado con el nombre de Mexolina; éste presentaba un octanaje RON de alrededor de 70.

Entre los años 50's y 70's, las exigencias de calidad de las gasolinas cambiaron como resultado de nuevos desarrollos tecnológicos en los motores. Para dar cumplimiento a los requerimientos se incorporaron nuevos procesos en la industria de refinación para producir naftas de alto octano. Para atender esta demanda, en nuestro país se comercializaban las siguientes gasolinas: Mexolina (70 octanos RON), Super Mexolina (80 octanos RON), Gasolmex (90 octanos RON) y la Pemex 100 (100 octanos RON).

En la década de los 70's, resultado del embargo petrolero en el Medio Oriente, se presenta a nivel mundial una crisis energética. Como respuesta a este evento, la industria automotriz diseña automóviles con menor peso y tamaño, pero con una mayor economía de combustible (expresada como kilómetros recorridos por litro de gasolina consumida o millas por galón). Como respuesta, en nuestro país se eliminan los diferentes tipos de gasolinas comercializados, para dar paso a dos tipos de combustibles identificados como Nova y Extra (la primera de 81 octanos y la segunda de 92 octanos, ambos valores expresados en RON).

Desde la época de los 30's hasta los 70's, la industria de refinación obtenía principalmente el incremento de octano a través de la incorporación de un aditivo antidetonante a base de plomo (tetraetilo de plomo TEP); los valores típicos de concentración del metal fluctuaban entre 3 y 4 gramos por galón de gasolina (0.8 a 1.0 gramos por litro).

A mediados de los 70's, resultado de evaluaciones sobre el impacto a la salud del plomo y de la búsqueda de reducir la contribución de las emisiones vehiculares a la contaminación atmosférica, se inicia en los Estados Unidos el proceso de eliminación del plomo en las gasolinas. Esta acción demandó el desarrollo de nuevos procesos en la industria de refinación que permitiesen sustituir el incremento de octano logrado con el TEP, por componentes obtenidos a través de la conversión de corrientes de bajo por alto octano.

Esta época es el parteaguas a nivel mundial; a partir de ella se empieza el establecimiento de límites más estrictos a las emisiones generadas en los vehículos. La reducción y eliminación del plomo obedeció, como se citó en primer lugar, a los efectos nocivos que para la salud este metal tiene y, en segundo lugar, como una exigencia de la industria automotriz, quien incorporó la primera generación de dispositivos anticontaminantes (convertidores catalíticos), con el fin de satisfacer los requerimientos de las autoridades ambientales para obtener menos emisiones por distancia recorrida de los vehículos.

En los Estados Unidos el proceso de eliminación del plomo se inicia en 1974, con la aparición en el mercado de vehículos equipados con convertidor catalítico del tipo identificado como dos vías (por sólo reducir las emisiones de hidrocarburos no quemados HC y monóxido de carbono CO).

---

En nuestro país, a partir de los años 80's se inicia el proceso de reducción del plomo en las gasolinas, siendo la primera etapa el Valle de México, continuando las acciones al resto del País. En esta época se comercializaban dos tipos de productos la Nova Plus y la Extra Plus (la primera de 81 octanos y la segunda de 92 octanos, ambos expresados como RON).

Para atender la compleja problemática de la Zona Metropolitana del Valle de México, Pemex, inicia en 1986 un proceso de mejoramiento continuo de las gasolinas que se consumen en esta región del país.

Así, se inicia la reducción de los límites máximos especificados de contenido de plomo en la gasolina Nova Plus, pasando de un valor de 3.5 a 1.0 gramos de plomo por galón (g/gal). En esa época se incorpora un aditivo del tipo detergente con el fin de prevenir y controlar la formación de depósitos en los sistemas de admisión y escape de los vehículos, flotilla caracterizada por autos carburados.

En cuanto a la Extra Plus, no se le adicionaba plomo, pero se le permitía un límite máximo de 0.05 g Pb/gal, condición que no hacía viable la incorporación de dispositivos anticontaminantes en los vehículos, sumado a una casi nula regulación de emisiones.

En el período 1980 a 1990, la gasolina con plomo (Nova Plus), redujo su especificación máxima de contenido de plomo en el Valle de México, de tal forma que al final de esta época, la disminución representa más del 90%. Adicionalmente, se incorporó a la formulación de la gasolina compuestos oxigenados (éter metilterbutílico MTBE) y se sustituyó el aditivo detergente por uno del tipo detergente dispersante, con el fin de mejorar el proceso de combustión, prevenir y controlar la formación de depósitos; acciones que sumadas se traducen en menores emisiones producidas por kilómetro recorrido de los autos.

Cabe mencionar que la agregación de los aditivos de tipo detergente y dispersante a las gasolinas comercializadas en nuestro país en ese período (Nova Plus y Extra Plus), se llevó a cabo en todo el territorio nacional y no solamente en el Valle Metropolitano.

Para poder dar paso a una normatividad de emisiones más estricta en materia vehicular, así como satisfacer los requerimientos de vehículos con mayor relación de compresión, a partir de 1990 se introduce a nivel nacional la gasolina sin plomo Magna Sin (hoy Pemex Magna); producto similar a la Unleaded Regular 87 Fungible de los Estados Unidos.

La introducción de la gasolina sin plomo en 1990, permitió a la industria automotriz la incorporación de los convertidores catalíticos en los vehículos 1991 y posteriores; esfuerzo conjunto de la industria petrolera y automotriz para reducir el impacto de las emisiones de los autos.

En el caso del Valle de México, a partir de 1992, se establecieron límites máximos en el contenido de aromáticos, olefinas, benceno y se redujo el valor superior especificado a la presión de vapor, acciones encaminadas a reducir la toxicidad y reactividad de las emisiones vehiculares en esta región del país.

Cabe mencionar, que como una estrategia para reducir los episodios de contingencias ambientales durante la época invernal en el Valle de México, se concertaron con las autoridades ambientales límites más estrictos a los parámetros citados en el párrafo anterior, en particular los relacionados con el nivel máximo de aromáticos, olefinas y benceno.

En octubre de 1996, a solicitud de las autoridades ambientales, se establecen límites máximos más restrictivos de los compuestos fotorreactivos y tóxicos presentes en la gasolina sin plomo Pemex Magna, así como una reducción significativa del contenido de azufre; acciones que sumadas se traducen en un mejor desempeño de los dispositivos anticontaminantes y en menores emisiones de compuesto precursores de la formación del ozono y tóxicos a la salud.

En marzo de 1996 se introdujo al mercado la nueva Gasolina Pemex Premium, para motores de alta compresión y con 93 octanos, la citada gasolina es de alto rendimiento y proporciona mayor protección para la vida del motor, actualmente, se expende en Estaciones de Servicio Franquiciadas en casi todo el territorio nacional.

Actualmente en el Valle de México se puso a disposición del público consumidor la nueva gasolina Pemex Premium de bajo azufre, de 92 octanos, con lo que se contribuye a abatir las emisiones contaminantes a la atmósfera en cumplimiento con las más estrictas normas ambientales a nivel internacional y nacional (Pemex, 1997).

## 1.5 PROCESO DE DISTRIBUCIÓN DE GASOLINAS

Para garantizar el abastecimiento nacional con eficiencia y flexibilidad, se dispone de varios elementos para la distribución de hidrocarburos (Figura 1.21): terminales terrestres y marítimas, medios de transporte, marítimo y ductos.



Figura 1.21 Medios de transporte empleados en la distribución de la gasolina  
Fuente: Informe de rendición de cuentas de la administración pública 2000-2006 etapa 1

Con el objeto de realizar adecuadamente la comercialización de sus productos, Pemex ha desarrollado una infraestructura para almacenar, transportar y entregar oportunamente a los consumidores finales, los productos que demande, integrada por centro de embarque y almacenamiento, así como por una extensa red de transportación terrestre y marítima.

El proceso de distribución implica un gran esfuerzo debido a que las zonas productoras de gas, crudo, refinados y petroquímicos se encuentran alejados de los centros de consumo.

La cadena de suministro simplificada se muestra en la figura 1.22.

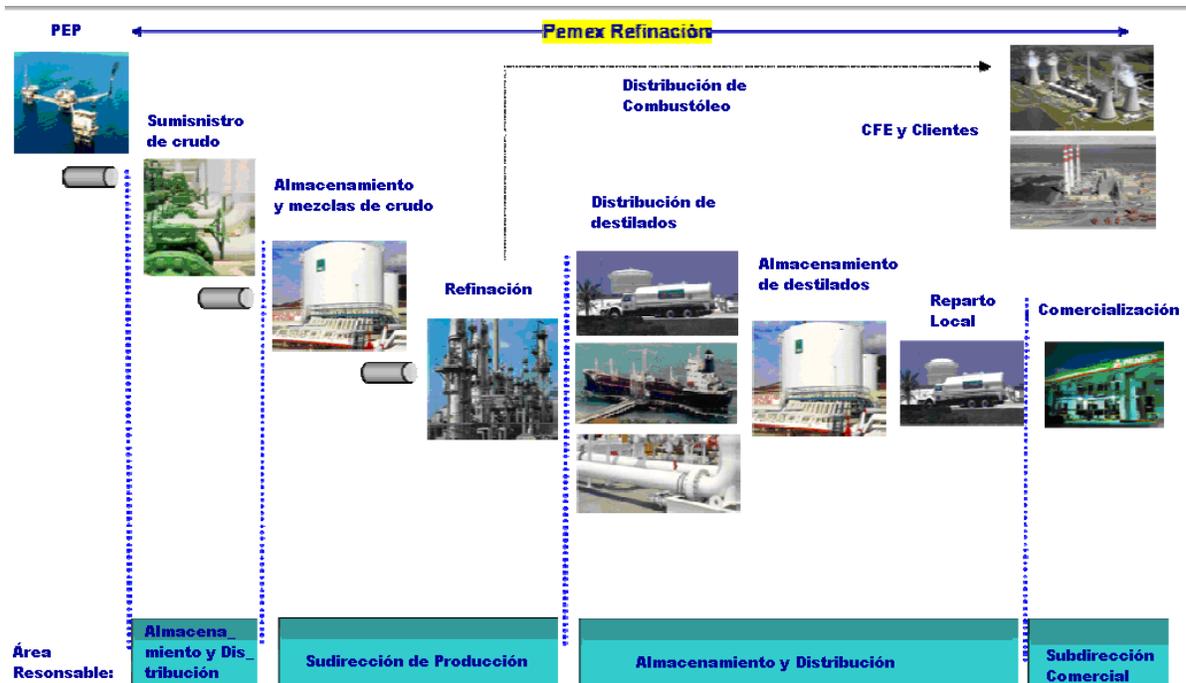


Figura 1.22 Cadena de suministro de la gasolina  
 Fuente: Informe de rendición de cuentas de la administración pública 2000-2006 etapa 1

En la figura 1.22 se observa que el petróleo crudo recibido directamente de Pemex Exploración y Producción se transporta principalmente por los oleoductos hacia las 6 refinерías en donde se procesa para generar productos petrolíferos (Ver fig. 1.23), mismos que se distribuyen por los diferentes medios de transporte: poliductos, buquetanques, autotanques y carrotanques hacia las terminales de almacenamiento y distribución ya sea a las 15 marítimas o a las 77 terrestres. A partir de éstas, los petrolíferos se envían por autotankero a las estaciones de servicio para su venta final al público.



Figura 1.23 Localización de refinерías y zonas productoras de petróleo  
 Fuente: Informe Pemex 2006 de desarrollo sustentable

Las Terminales de Almacenamiento y Distribución (TAD) con que cuenta la Subdirección de Almacenamiento y Distribución en el Territorio Nacional se encuentran distribuidas de la siguiente manera:

En la zona centro del país y valle de México 21 terminales terrestres, en la zona occidente 20 terminales terrestres y 9 marítimas, en la zona norte 20 terminales terrestres, y en la zona sur 16 terminales terrestres y 6 marítimas (Ver Fig. 1.24).



Figura 1.24 Localización de las Terminales terrestres de almacenamiento y distribución  
Fuente: Estrategia para el control de la cadena de distribución y venta de combustibles (PEMEX, 2006)

Las TAD distribuyen las gasolinas en auto tanques de 20,000 y 30,000 litros a las estaciones de servicio (Ver fig. 1.25). Al mes de agosto de 2006, Pemex Refinación contaba con una flota propia de autotanques para reparto local de combustibles a las estaciones de servicio de 1,286 unidades, cuya antigüedad promedio es alrededor de 10 años.



Figura 1.25 Distribución de gasolina en la estación de servicio  
Fuente: Revista octanaje No. 29 (Pemex, 2001)

A nivel nacional Pemex se encarga de proveer los combustibles automotrices que demanda la sociedad mexicana. En las Estaciones de Servicio es en donde Pemex interactúa cotidianamente con los clientes, en las miles de operaciones que día a día se realizan ininterrumpidamente a lo largo del país Pemex Refinación, en cumplimiento a las disposiciones constitucionales y en materia de competencia económica, no tiene establecida una distancia mínima entre las Estaciones de Servicio, con lo que promueve el incremento de la calidad en el Servicio que recibe el consumidor final. Por tal motivo no se definen zonas territoriales para que las Estaciones de Servicio operen en ella en forma exclusiva. La comercialización de combustibles se realiza a través de 7,568 (Ver Fig. 1.26) Estaciones de servicio en el país que actualmente están incorporadas al sistema de la Franquicia Pemex en la que participan los inversionistas mexicanos bajo los marcos regulatorios que se tienen.



Figura 1.26 Número de estaciones de servicio en México  
Fuente: Etapa 3 del Informe de rendición de cuentas de la administración pública 2000-2006

**1.5.1 La distribución de gasolinas en el Distrito Federal**

Para la distribución de gasolinas en el DF se cuenta con 4 terminales donde se almacena y distribuye gasolinas, diesel y turbosina (Ver Fig. 1.27)

- TAD Azcapotzalco 18 de Marzo
- TAD Sat. Sur Barranca del muerto
- TAD Sat. Norte San Juan Ixhuantepec
- TAD Sat. Oriente Añil



Figura 1.27 Ubicación de las terminales de almacenamiento y distribución en el DF  
Fuente: Elaboración propia utilizando Transcad 4.5

La TAD Azcapotzalco recibe petrolíferos de las refinерías de Tula a través de dos poliductos de 16 y 12 pulgadas de diámetro; de la Refinería de Minatitlán a través de un poliducto de 16 pulgadas, y de la Terminal de Tuxpan (Ver fig. 1.28), por conducto de un poliducto de 14 pulgadas.

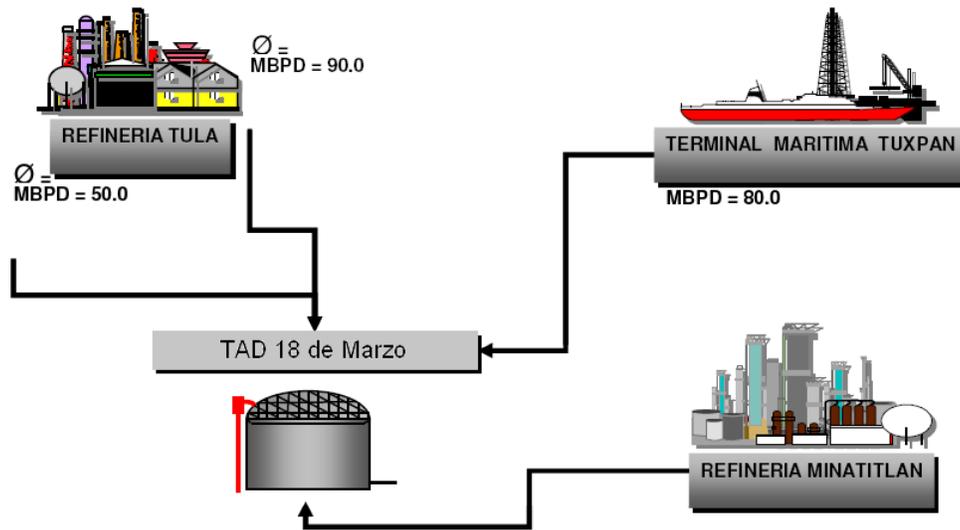


Figura 1.28 Recibo de gasolinas en la TAD Azcapotzalco 18 de marzo  
Fuente: Subdirección de Proyectos Pemex-Refinación comunicación social

La TAD Azcapotzalco 18 de marzo envía gasolina a las TAD Sat. Norte San Juan Ixhuatepec (TSN), TAD Barranca Oriente (TSO), TAD Sat. Sur Añil (TSS), y turbosina a la TA del aeropuerto A.S.A.

por medio de poliductos de 8 y 12 pulgadas. La máxima recepción diaria total de los cuatro poliductos es de 295 mil barriles (Ver fig. 1.29)

### Envío por poliducto

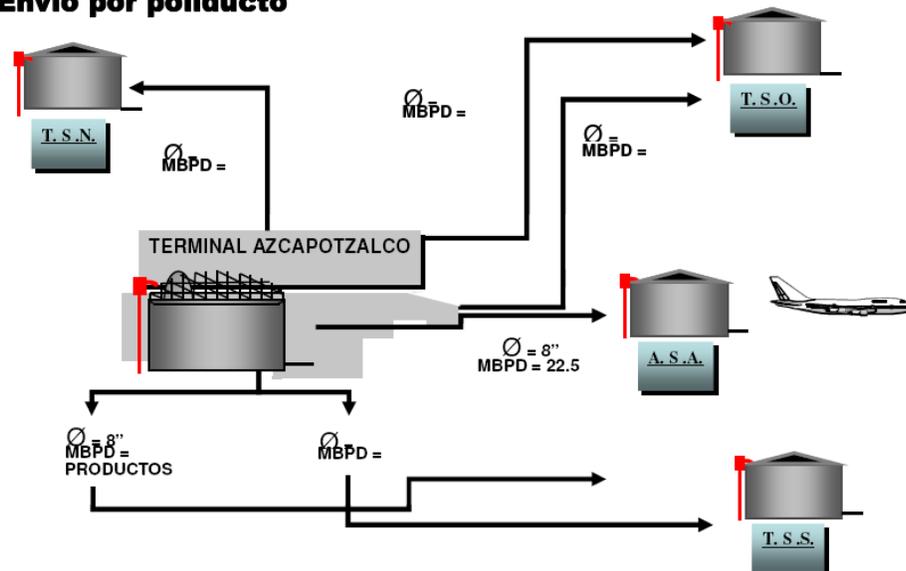


Figura 1.29 Distribución de petrolíferos por poliducto en la TAD Azcapotzalco 18 de marzo  
Fuente: Subdirección de Proyectos Pemex-Refinación comunicación social

A partir de las cuatro TAD, las gasolinas se envían por autotanque de 20,000 litros a las estaciones de servicio para su venta final al público. Se estima que la flota de autotanques es la que se presenta en la tabla 1.1

Terminal	Autotanques
Azcapotzalco 18 de Marzo OXI	72
Terminal Sat. Sur Barranca OXI	85
Terminal Sat. Norte San Juan Ixhuantepec OXI	50
Terminal Sat. Oriente Añil OXI	45

Tabla 1.1 No. de autotanques por estación de servicio  
Fuente: Revista Octanaje 24, 26 (Pemex, 2001)

La distribución se realiza en tres turnos diarios donde los viajes promedios son 4 por operador y se realizan 12 viajes diarios por autotanque.

### 1.5.2 Ubicación de las estaciones de servicio en el DF

La comercialización de gasolinas y diesel se realiza a través de 320 Estaciones de Servicio distribuidas como se muestra en la figura 1.30.

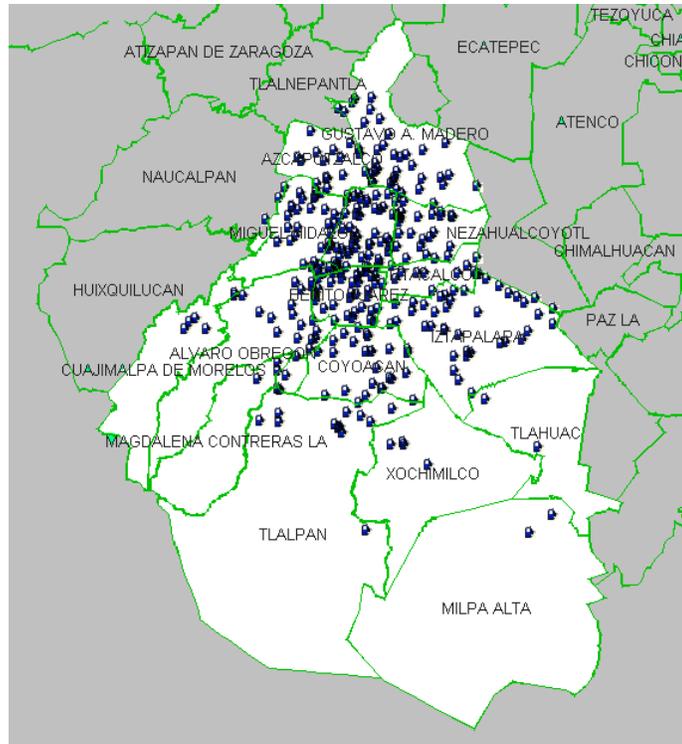


Figura 1.30 Distribución de Estaciones de Servicio en el DF  
Fuente: Elaboración propia utilizando Transcad 4.5

La mayor concentración de estaciones de servicio se da en el centro y norte del Distrito Federal en la figura 1.31 se muestran las delegaciones con mayor número de estaciones de servicio.

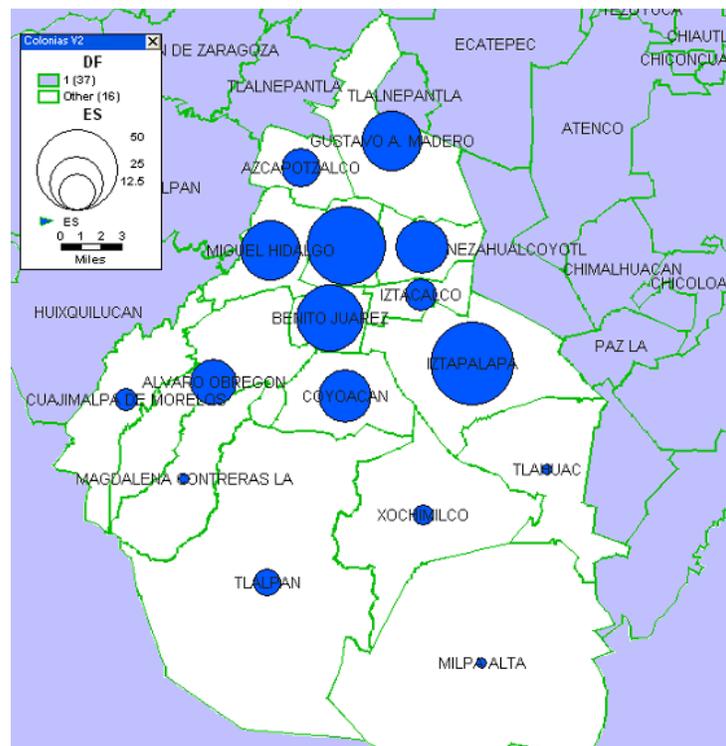


Figura 1.31 Número de estaciones de Servicio por delegación  
Fuente: Elaboración propia utilizando Transcad 4.5

---

## 1.6 PROBLEMÁTICA

El problema de la movilidad no puede dissociarse del crecimiento caótico que ha tenido la Ciudad de México. Hace más de cinco décadas inició la ocupación masiva de su territorio por una población en crecimiento constante y con actividades muy diversas que excedió los límites administrativos y políticos de la ciudad, para mezclarse con los municipios del vecino Estado de México y que hoy integra a las 16 delegaciones del DF, con los 58 municipios del Estado de México y uno del Estado de Hidalgo, para configurar la zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM). La población pasó de 2 millones 953 mil habitantes en 1950 a 18 millones 210 mil en el año 2000. La ocupación física del territorio pasó de 22 mil hectáreas a más de 741 mil hectáreas, que representa el 0.37% de la superficie total del país. En este fragmento del territorio nacional ocurrió la concentración humana, industrial, comercial y financiera más importante del país, donde se asientan 35 mil industrias y 3.5 millones de vehículos con altos consumos de energía fósil (gasolinas, diesel y gas) En la ciudad de México se consume aproximadamente 25 millones de litros de combustibles diariamente; para satisfacer esta demanda se requiere realizar cerca de 1,200 viajes en autotanques cargados con combustibles (<http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm>).

Existen varios factores que en caso de un incidente que involucre un autotanque de gasolina, contribuirían de manera desfavorable con las acciones de respuesta a emergencia:

- A) La ubicación de las estaciones de servicio en el Distrito Federal. El 70% de las estaciones de servicio se encuentra en la red vial primaria, el otro 30% se ubica en la red vial secundaria. La distribución de gasolina se realiza en su mayor parte utilizando la red vial primaria; en caso de un incidente, las vías de acceso podrían quedar bloqueadas para los equipos de emergencia.
- B) Los horarios de distribución de gasolina. Éstos abarcan día y noche; la población expuesta en horarios de congestión pico podría ser mucho mayor en caso de un incidente.
- C) La congestión cotidiana en la red vial del Distrito Federal. En la actualidad la red vial del Distrito Federal resulta insuficiente para satisfacer la demanda de movilidad en ciertos períodos, debido a esto se generan colas de espera para ingresar a algunas vialidades. En caso de un incidente, si el autotanque bloquea o reduce los carriles de la vía por la que circula, los vehículos detrás del autotanque quedarían imposibilitados de ser evacuados hacia adelante, debido a la reducción de flujo y, aunque lo lograran se toparía con los autos que ya estaban enfrente del autotanque; también sería difícil evacuarlos hacia atrás debido a la llegada constante de vehículos que se acumularían produciendo alta congestión; a su vez estos vehículos bloquearían las acciones de respuesta a emergencia.
- D) El ambiente urbano con zonas densamente pobladas. Debido al gran crecimiento demográfico en la ciudad de México resultaría prácticamente imposible para los equipos de respuesta a emergencia poder cumplir con la evacuación de 800 metros a la redonda, establecidos por la subdirección de auditoría en seguridad industrial y protección ambiental (Pemex, 2006)

En las ciudades pobladas con alto crecimiento, la tendencia de las Estaciones de Servicio, así como la demanda por los combustibles ha ido en aumento, datos estadísticos muestran que la venta promedio por Estación de Servicios es casi tres veces mayor a la de otros países como los Estados Unidos (Pemex 2006) (Ver fig.1.32).

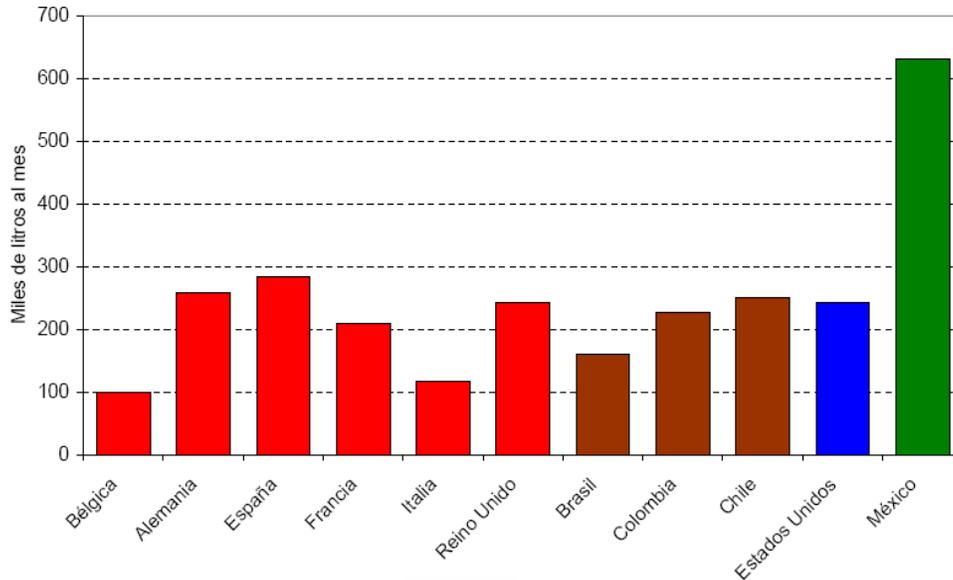


Figura 1.32 Venta promedio por estación de servicio

Fuente: Estrategia para el control de la cadena de distribución y venta de combustibles Pemex 2006

Por estas razones es necesario poner atención en el transporte de gasolinas y diesel que se realiza en el Distrito Federal, para poder realizar la distribución de la manera que se reduzca dentro de lo posible la población expuesta al riesgo inherente de esta actividad.

---

## CAPÍTULO 2

### EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE

#### 2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centra en los problemas de transporte con respecto al envío de mercancías entre orígenes y destinos a costo mínimo. En la primera parte se presentan los problemas de transporte, de la ruta más corta, y de rutas de vehículos con sus principales variantes. En la segunda parte se dan a conocer las características de los sistemas de información geográfica y los sistemas de información geográfica para transporte, donde además se presentan algunas de las características del programa TransCAD, el cual será utilizado en el presente estudio.

#### 2.2 PROBLEMAS DE REDES DE TRANSPORTE

El transporte es una de las actividades económicas y sociales más importantes del hombre. Las acciones que corresponden al transporte pueden ser tan complejas que se ha vuelto indispensable utilizar las matemáticas avanzadas y las tecnologías más modernas para poder organizarlas y llevarlas a cabo. Una de las herramientas matemáticas utilizadas para estudiar las operaciones asociadas al transporte es la teoría de redes de transporte (Taha 1994).

##### 2.2.1 Definiciones de Redes

A continuación se presentan algunos conceptos de redes tomados de Taha (1994):

Una red consta de un conjunto de nodos conectados por arcos (ramas, aristas o vértices). Asociado a cada arco se tiene un flujo de algún tipo. La notación estándar para describir una red  $G$  es  $G = (N, A)$ , donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  es el conjunto de arcos.

En general, el flujo en un arco está limitado por su capacidad que puede ser finita o infinita. Se dice que un arco está dirigido u orientado si permite un flujo positivo en una dirección, y cero flujo en la dirección opuesta. Una red dirigida es una red con todos sus arcos dirigidos.

Una trayectoria es una secuencia de arcos distintos que conectan dos nodos sin considerar la orientación de los arcos individuales. Una trayectoria forma un lazo (ciclo) si conecta un nodo consigo mismo. Un lazo dirigido es un lazo donde todos los arcos tienen la misma dirección. Una red conectada es una red donde cada dos nodos distintos están conectados por una trayectoria. Un árbol es una red conectada que puede constar sólo de un subconjunto de los nodos sin lazos y, un árbol extenso, es una red conectada que incluye todos los nodos de la red sin lazos.

##### 2.2.2 El Problema de Transporte o de Hitchcock

A continuación se presenta el problema de transporte tomado de Taha (1994). Este problema busca elegir un plan óptimo de envío de una mercancía desde varios orígenes (por ejemplo, plantas de producción) a varios destinos (por ejemplo, centros de almacenamiento o consumo) de forma que el costo sea mínimo.

Entre los datos del modelo se encuentran:

- A) El nivel de oferta en cada fuente y la cantidad de la demanda en cada destino.
- B) El costo de transporte unitario de la mercancía de cada origen a cada destino.

Como sólo hay una mercancía, un destino puede recibir su demanda de una o más fuentes. El objetivo del modelo es el de determinar, la cantidad que se enviará de cada fuente a cada destino, tal que se minimice el costo de transporte total. La suposición básica del modelo es que el costo del transporte en una ruta es directamente proporcional al número de unidades transportadas. La definición de “unidad de transporte” variará dependiendo de la “mercancía” que se transporte. En cualquier caso, las unidades oferta y demanda deben ser consistentes con nuestra definición de “unidad de transporte” (Taha, 1994).

La figura 2.1 representa el modelo de transporte como una red con  $m$  orígenes y  $n$  destinos. Un origen o un destino está representado por un nodo, el arco que une un origen con un destino representa la ruta por la cual se transporta la mercancía. La cantidad de la oferta en el origen  $i$  es  $a_i$ , y la demanda en el destino  $j$  es  $b_j$ . El costo de transporte unitario entre el origen  $i$  y el destino  $j$  es  $C_{ij}$ .

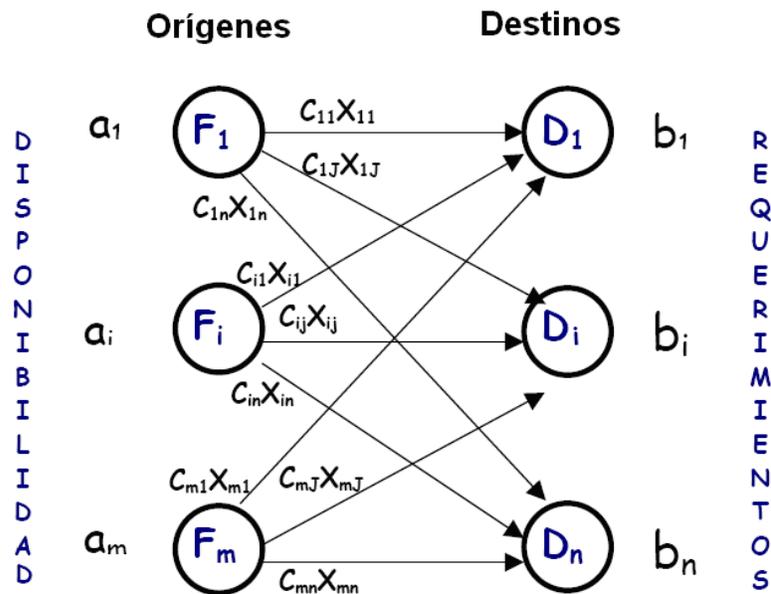


Figura 2.1 Representación del modelo de transporte como una red con  $m$  orígenes y  $n$  destinos  
Fuente: [www.investigacion-operaciones.com](http://www.investigacion-operaciones.com)

Si  $X_{ij}$  representa la cantidad transportada desde el origen  $i$  y el destino  $j$ , el problema de transporte se formula de la siguiente manera:

$$\min \dots z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \leq a_i \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} \geq b_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} \geq 0$$

La restricción (1) asegura que la suma de los envíos desde una fuente no sea mayor que su oferta; en forma análoga, la restricción (2) asegura que la suma de los envíos a un destino satisfaga su demanda. Este modelo implica que la oferta total, sea cuando menos igual a la demanda total. Cuando la oferta

total es igual a la demanda total ( $\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i$ ), la formulación resultante recibe el nombre de

modelo de transporte balanceado.

El problema de transporte balanceado se formula de la siguiente manera:

$$\min \dots z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} \geq 0$$

Para el problema de transporte las ofertas y las demandas tienen un valor entero, de esta forma todas las variables básicas  $X_{ij}$ , en toda solución básica inicial factible (incluyendo la óptima), tendrán valores enteros.

El modelo de transporte es básicamente un programa lineal que se puede resolver a través del método simplex regular. Sin embargo, su estructura especial hace posible el desarrollo de un procedimiento de solución, conocido como técnica de transporte, que es más eficiente en términos de cálculo. Los métodos de esquina noroeste, costo mínimo y aproximación de Vogel son alternativas para encontrar una solución inicial factible.

### Técnica de Transporte

Los pasos básicos de la técnica de transporte son:

Paso 1: Se determina una solución factible inicial

Paso 2: Se determina una variable que entra, que se elige entre las variables no básicas. Si todas estas variables satisfacen la condición de optimalidad (si todos los coeficientes de la ecuación son no negativos), termina de lo contrario, ir al paso 3

Paso 3: Se determina la variable que sale (la variable básica que tiene la razón más pequeña positiva) de entre las variables de la solución básica actual; después se obtiene la nueva solución básica y se regresa al paso 2.

Método de solución inicial.

Si el modelo de transporte es formulado como una tabla simplex, es necesario utilizar variables artificiales para que se asegure una solución básica inicial. Cuando se utiliza la tabla de transporte, una solución factible básica inicial se puede obtener fácil y directamente. Se presenta un procedimiento llamado regla de la esquina noroeste para este fin. Se presentan otros dos procedimientos, llamados costo mínimo y aproximación de Vogel. Estos procedimientos suelen producir soluciones iniciales óptimas en el sentido de que los valores asociados de la función objetivo son más chicos.

### Esquina Noroeste.

Este método se considera el más fácil pero es aquel que menos probablemente dé una buena solución inicial y de "bajo costo", ya que ignora la magnitud relativa de los costos  $C_{ij}$ . Para este procedimiento, es necesario establecer que el número de variables básicas en cualquier solución básica de un problema

---

de transporte es una menos de la que se espera. Normalmente en los problemas de programación lineal se tiene una variable básica para cada restricción. En los problemas de transporte con  $m$  recursos y  $n$  destinos el número de restricciones funcionales es  $m + n$ . Sin embargo, el número de variables básicas  $= m + n - 1$ .

Los pasos del método son los siguientes:

Paso 1. Se comienza asignando la máxima cantidad posible a la variable  $X_{11}$ , de manera que se satisfaga totalmente la demanda (columna), o bien, se agote la oferta (renglón). Como en el primer caso se satisface la demanda, se tacha la columna y, en el segundo caso, como lo que se agota es la oferta se tacha el renglón, indicando que las variables son iguales a cero.

Paso 2. Cuando se satisface simultáneamente un renglón y una columna, solo se tacha uno de ellos, el renglón o la columna. Esta condición garantiza la ubicación automática de variables básicas cero, si las hay.

Paso 3. Después de ajustar las cantidades de oferta y demanda de todos los renglones y columnas no tachados, la cantidad factible máxima se asigna al primer elemento de la nueva columna (renglón). El proceso termina cuando se deja de tachar exactamente un renglón o columna.

### **Costo Mínimo.**

Este es un procedimiento que utiliza como base a las rutas que tengan el menor costo. Los pasos del método son los siguientes:

Paso 1. Se asigna el valor más grande posible a la variable con menor costo unitario de toda la tabla. (Los empates se rompen arbitrariamente).

Paso 2. Se tacha el renglón o columna satisfecha. (Como en el método de la esquina noroeste, si una columna y un renglón se satisfacen de manera simultánea, sólo una puede tacharse). Después de ajustar la oferta y la demanda de todos los renglones y columnas no tachados

Paso 3. Se repite el proceso asignando el valor más grande posible a la variable con el costo unitario no tachado más pequeño. El procedimiento termina cuando queda exactamente un renglón o una columna sin tachar.

### **Método de Aproximación Vogel.**

Este método es heurístico y suele producir una mejor solución inicial que los métodos anteriores. De hecho, suele producir una solución inicial óptima, o próxima al nivel óptimo.

Los pasos del método son los siguientes:

Paso 1. Se evalúa una penalización para cada fila (columna) restando el menor elemento de costo de la fila (columna) del elemento de costo menor que le sigue en la misma fila (columna).

Paso 2. Se identifica a la fila o columna con mayor penalización, rompiendo empates en forma arbitraria. Se asigna el mayor valor posible a las variables con el costo más bajo de la fila o columna seleccionada. Se ajusta la oferta y la demanda y se tacha la fila o columna satisfecha. Si una fila y una columna se satisfacen al mismo tiempo, sólo uno de ellos se tacha y a la fila (columna) restante se le asigna una oferta (demanda) cero. Ninguna fila o columna con oferta o demanda cero debe utilizarse para calcular penalizaciones futuras (en el paso 3).

Paso 3.

A) Si sólo hay una fila o columna sin tachar, se termina.

B) Si sólo hay una fila (columna) con oferta (demanda) positiva sin tachar, se determinan las variables básicas de la fila (columna) a través del método de costo mínimo.

C) Si todas las filas o columnas sin tachar tienen oferta y demanda cero (asignadas), se determinan las variables básicas cero a través del método de costo mínimo y se concluye.

D) De lo contrario, se calculan las penalizaciones de los renglones y columnas no tachados y después se va al paso 2 (los renglones y columnas con oferta y demanda cero asignadas no deben utilizarse para determinar estas penalizaciones).

### 2.2.3 Modelo de Asignación

A continuación se presenta el modelo de asignación tomado de Taha (1994). El modelo de asignación es un caso particular del modelo de transporte, que consiste en asignar  $m$  trabajos (o trabajadores) a  $n$  máquinas. Un trabajo  $i(= 1,2,\dots,m)$  cuando se asigna a la máquina  $j(= 1,2,\dots,n)$  incurre en un costo  $C_{ij}$ . El objetivo es el de asignar los trabajos a las máquinas (un trabajo por máquina) al menor costo total.

La formulación de este problema puede considerarse como un caso especial del modelo de transporte. Aquí los trabajos representan “orígenes” y las máquinas “destinos”.

Antes de que el modelo se pueda resolver a través de la técnica de transporte es necesario equilibrar el problema sumando trabajos o máquinas ficticios, dependiendo de si  $m < n$  ó  $m > n$ . Por lo tanto, se supondrá que  $m = n$  sin que se pierda la generalidad (Taha, 1994).

El problema de asignación se formula de la siguiente manera:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{si el } i\text{-ésimo trabajo se asigna a la } j\text{-ésima máquina} \\ 0, & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

$$\min \dots z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = a_i \quad i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = b_j \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$X_{ij} = 0,1$$

La función objetivo minimiza el costo total de la asignación. La restricción (1) asegura que la suma de asignaciones sea igual a los trabajadores (oferta); en forma análoga, la restricción (2) asegura que la suma de asignaciones sea igual a las máquinas (demanda).

La estructura especial del modelo de asignación hace posible crear un método de solución eficiente llamado, método húngaro.

### Método Húngaro

Primero se revisa que la matriz tenga en todos los elementos sus costos (beneficios) unitarios correspondientes. Si alguno no lo tiene se le asigna en términos del tipo de matriz y problema considerado.

Caso A: Minimización

Paso 1. Se balancea el modelo, es decir se obtiene  $m=n$  (matriz cuadrada)

En donde  $m$ = número de renglones.

En donde  $n$ = número de columnas.

Paso 2. Para cada renglón se escoge el elemento menor y se resta de todos los demás en el mismo renglón.

Paso 3. Para cada columna se escoge el elemento menor y se resta de todos los demás en la misma columna.

Paso 4. Se traza el mínimo número de líneas verticales y horizontales de forma tal que todos los ceros queden tachados.

Paso 5. Criterio de optimidad:

¿El número de líneas es igual al orden de la matriz?

SI, el modelo es óptimo se hace la asignación. La asignación se debe hacer donde haya ceros cuidando que cada renglón y cada columna tenga una sola asignación.

NO, pasar al siguiente punto.

Paso 6. Se selecciona el elemento menor no tachado de toda la matriz. El valor se resta de todo elemento no tachado y se suma a los elementos en la interacción de dos líneas.

Paso 7. Regresar al paso 4.

Caso B: Maximización.

Se selecciona el elemento más grande de toda la matriz de beneficio. Este valor se resta de todos los demás, los valores negativos que se obtengan representan los costos de oportunidad, lo que se deja de ganar o producir.

Para el caso de la solución del modelo considerar solo valores absolutos. Con esta transformación se ha obtenido un modelo de minimización y se puede resolver como tal.

### 2.2.4 Modelo de Transbordo

El modelo de transporte estándar supone que la ruta directa entre una fuente y un destino es una ruta de costo mínimo. El modelo de transbordo es un método alternativo para obtener el costo de envío directo mínimo. La formulación del modelo de transbordo tiene la característica adicional de permitir que las unidades transportadas desde todos los orígenes pasen a través de nodos intermedios o transitorios, antes de que lleguen por último a su destino designado. Esta formulación combina el modelo de transporte básico con el de la ruta más corta en un solo procedimiento (Taha, 1994).

El problema de transbordo de manera general se formula de la siguiente manera:

$$\min .z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^k C_{jk} X_{jk} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^k C_{ik} X_{ik}$$

s.a :

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} + \sum_{k=1}^k X_{ik} \leq a_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ik} + \sum_{j=1}^n X_{jk} \geq b_k \quad \forall k = 1, \dots, k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ij} = \sum_{k=1}^k X_{jk} \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$X_{ij}, X_{jk} \geq 0$$

La restricción (1) asegura que las unidades transportadas no superen a la oferta disponible, la restricción (2) asegura que se cumpla con la demanda, y la restricción (3) asegura que la suma total del flujo entrante sea igual a la suma total del flujo saliente ([www.investigación-operaciones.com](http://www.investigación-operaciones.com)).

### 2.2.5 Problema de Ruta Mínima

El problema consiste en determinar los arcos conectados en una red de transporte que constituyen, en conjunto la distancia (o costo) más corta entre dos nodos el punto de partida o nodo inicial llamado origen y el punto final o nodo final llamado destino (Taha, 2004).

A continuación se presenta el problema de ruta mínima tomado de Ball (1995).

Se considera una red dirigida  $G = (N, A)$  donde  $N$  es el conjunto de nodos y  $A$  es el conjunto de arcos. Cada arco  $(i, j) \in A$  tiene una longitud de arcos (o costos)  $C_{ij}$ . El objetivo es encontrar una trayectoria en la red desde el origen hasta el destino que represente la distancia más corta. La variable de decisión  $X_{ij} = 1$  indica si el arco de  $i$  a  $j$  pertenece a la ruta más corta y  $X_{ij} = 0$  en caso contrario.

El modelo de ruta más corta se formula de la siguiente manera:

$$\text{Min...} z = \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij}$$

s.a.

$$\sum_{\{j:(i,j) \in A\}} X_{ij} - \sum_{\{j:(j,i) \in A\}} X_{ji} = b_i \quad \forall i \in N \quad (1)$$

$$X_{ij} = 0,1$$

La función objetivo minimiza el costo de la ruta que es la distancia total desde el origen al destino, la restricción (1) se define por cada nodo que haya en la red del problema. El lado derecho de esta restricción identifica la naturaleza del nodo, que puede ser de tipo origen ( $b_i = 1$ ), Transbordo ( $b_i = 0$ ) o destino ( $b_i = -1$ ). El lado izquierdo de esta restricción enumera los arcos que llegan y salen de cada nodo.

### 2.2.6 Problema de Rutas de Vehículos

Los problemas de rutas de vehículos (Vehicle Routing Problem VRP) determinan un conjunto de rutas para una flota de vehículos que dan servicio a un conjunto de clientes. Este tipo de problemas es de los más importantes, y de los más estudiados dentro de los problemas de optimización combinatoria. Dantzig y Ramser fueron los primeros en introducir este tipo de problemas en 1954, cuando describieron una aplicación real concerniente a la distribución de gasolina para estaciones de servicio. Además se propuso una formulación matemática del problema, y una aproximación algorítmica. Unos años después, Clarke y Wright aportaron una propuesta de algoritmo voraz (greedy algorithm) que mejoraba la aproximación algorítmica de Dantzig y Ramser (Ruiz, 2004).

El VRP es un nombre genérico aplicado a una clase de problemas en los que debe determinarse un conjunto de rutas para una flota de vehículos que parten de uno o más depósitos o almacenes para satisfacer la demanda de varios clientes dispersos geográficamente. El objetivo es entregar la demanda de dichos clientes minimizando el costo total que se incurre en las rutas.

El VRP es un problema muy conocido que cae dentro de la denominada clase de problemas NP-Completo. Esto significa que el esfuerzo de computación que se ha de realizar para encontrar una solución óptima crece de forma exponencial con el tamaño del problema. Por este motivo se recurre al empleo de métodos aproximados de manera que se pueda encontrar soluciones suficientemente buenas en un tiempo de computación razonable ([www.personales.upv.es](http://www.personales.upv.es)).

Ruiz (2004) describe brevemente al VRP como un conjunto de  $n$  clientes con una demanda conocida  $d_i$ ,  $i \in 1, \dots, n$  que tienen que ser atendidos desde un origen central con una flota  $t$  de vehículos con una capacidad  $Q$ . Normalmente el objetivo es minimizar la distancia recorrida por la flota, pero también es común reducir los costos de la ruta.

El modelo de VRP se formula de la siguiente manera:

Parámetros

$Q$  = Capacidad del vehículo,

$n$  = Número de clientes,  
 $d_i$  = Demanda del cliente  $i$ ,  $i > 0$ ,  
 $C_{ij}$  = La distancia entre el cliente  $i$  y el cliente  $j$

Variables

$X_{ij}$  = 1 si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , y 0 en caso contrario

Donde  $ij \in \{0, \dots, n\}$  siendo 0 el depósito de origen

Función Objetivo

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \neq i}^n C_{ij} X_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n X_{ij} = 1, \quad \forall j, j \in \{1, \dots, n\} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^n X_{ij} = 1, \quad \forall i, i \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \in S}^n X_{ij} \leq |S| - 1, \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0, j \in T}^n X_{ij} \leq |T| - k \quad (4)$$

La función objetivo minimiza la distancia total recorrida por la flota de vehículos. La restricción (1) asegura que todos los clientes sean visitados por un vehículo. La restricción (2) asegura que el vehículo deje al cliente que visita. La restricción (3) asegura que los vehículos comiencen su ruta en el depósito de origen evitando posibles subrutas, esta restricción se agrega por cada posible subconjunto  $S$  de clientes sin incluir el depósito de origen. La restricción (4) considera la capacidad de los vehículos evitando sobrecargarlos, esta restricción se agrega por cada conjunto de clientes  $T$  (cada conjunto que satisfice  $\sum_{i \in T} d_i > Q$ ) incluyendo al origen y  $k$  es el número mínimo de los clientes que tienen que ser tomados en el conjunto de clientes  $T$  para evitar sobrecargar.

### Técnicas utilizadas para los problemas del VRP

Según Ruiz (2004) las técnicas utilizadas para resolver el VRP pueden separarse en métodos exactos, heurísticos y metaheurísticos las cuales se resumen a continuación:

- En cuanto a los técnicas exactas algunos ejemplos son:
  - Önal en 1996 propuso un modelo de programación entera mixta y un modelo de programación dinámica los cuales fueron aplicados para resolver un problema real de distribución para una compañía dedicada al negocio de productos agrícolas.
  - En el año 2000, Blasum y Hochstättler utilizaron una variación del algoritmo de ramificación y acotamiento (Branch and cut) para resolver el VRP con restricciones de capacidad simétricas. Lograron resolverlo de manera óptima pero a un costo computacional alto.
  - En el 2003 Toth y Vigo presentaron una revisión de los modelos y técnicas exactas del VRP. Aunque algunos de los modelos son convenientes para casos pequeños, ninguno de ellos logra resolver más que la versión básica del VRP.

- Las técnicas heurísticas son utilizadas para encontrar una solución subóptima para casos más grandes en períodos de tiempo razonables, algunos ejemplos son:
  - En 1996, Bachem aplicó una técnica heurística llamada intercambio simulado (Simulated Trading) con buenos resultados.
  - En 1996 Xu y Nelly utilizaron un algoritmo búsqueda tabú (Tabú Search) para resolver el VRP básico.
- Finalmente con relación a las técnicas metaheurísticas
  - En 1997, Bullnheimer aplicó otra metaheurística llamada sistema de hormigas (Ant System) al problema del VRP con una flota de vehículos homogénea.
  - En 1998, Rego utilizó el algoritmo de búsqueda tabú para resolver el VRP con restricciones de capacidad y distancia.
  - En 2000, De Backer presentó un trabajo utilizando dos metaheurísticas, búsqueda Tabú y búsqueda local dirigida (Guided Local Search).
  - Van Breedam en 2001 utilizó y comparó tres diferentes metaheurísticas para el problema básico del VRP, estas metaheurísticas fueron: búsqueda descendiente (Descent Search), búsqueda tabú y recocido simulado (Simulated Annealing).
  - En un trabajo posterior de 2002, Van Breedam comparó un total de 10 heurísticas, en este caso a variaciones ligeramente más sofisticadas del VRP.
  - En 2002, Ralphs propuso una nueva técnica para resolver el VRP con una flota de vehículos homogéneos.
  - El método llamado sinfonía (Symphony) utiliza una separación del algoritmo con ramificación paralela y un marco de corte (Cut Framework).

En muchas ocasiones los algoritmos exactos no son convenientes para situaciones reales, debido al tiempo computacional que requieren y que no son viables para muchas de las variaciones del VRP.

### 2.2.7 El Problema de Rutas de Vehículos con Restricciones de Capacidad

A continuación se presenta el problema de rutas de vehículos con restricciones de capacidad (Capacitated Vehicle Routing Problem CVRP) tomado de Chung-Ho (2008). El CVRP es una extensión del VRP, donde los vehículos tienen restricciones de carga. El objetivo del CVRP es minimizar el costo total de la flota de vehículos para atender al conjunto de clientes con demandas conocidas. Se considera que la flota es un número infinito de vehículos.

El problema básico de CVRP considera:

- A) Cada vehículo tiene la misma capacidad de carga
- B) Cada vehículo comienza en un solo origen
- C) Todos los clientes tienen demandas conocidas
- D) Cada cliente es visitado una vez
- E) Todos los vehículos tienen que regresar al origen
- F) La carga de cada vehículo no puede exceder la capacidad de carga máxima

El problema de CVRP se formula de la siguiente manera:

$$\min ..z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij}$$

s.a :

$$\sum_{i=1}^n q_i y_{ik} \leq Q, \quad k = 1, \dots, m \quad (1)$$

$$\sum_{i,j \in S} X_{ij} \leq |S| - 1, \quad S \subseteq \{2, \dots, n\} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ik} = \begin{cases} m, & i = 1 \\ 1, & i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = \sum_{i=1}^n X_{ji} = \begin{cases} m, & j = 1 \\ 1, & j = 2, \dots, n \end{cases} \quad (4)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, n$$

$$y_{ik} \in \{0,1\}, \quad i = 1, \dots, n; \quad k = 1, \dots, m$$

Donde  $C_{ij}$  es el costo de ir del cliente  $i$  al cliente  $j$ ,  $q_i$  es la demanda del cliente  $i$  y  $Q$  es la capacidad de carga del vehículo  $k$

$X_{ij} = 1$  si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , y 0 en caso contrario

$y_{ik} = 1$  si el cliente  $i$  es atendido por el vehículo  $k$ , y 0 en caso contrario

La función objetivo reduce el costo total de la ruta. La restricción (1) considera la capacidad de los vehículos evitando sobrecargarlos. La restricción (2) asegura que los vehículos comiencen su ruta en el depósito de origen evitando posibles subrutas, esta restricción se agrega por cada posible subconjunto  $S$  de clientes sin incluir el depósito de origen. La restricción (3) asegura que se todos los clientes sean atendido por un vehículo. La restricción (4) asegura que los vehículos regresen al depósito.

El CVRP puede ser resuelto por medio de técnicas exactas, heurísticas y metaheurística. Para el caso de las técnicas exactas el esfuerzo computacional requerido crece de manera exponencial con el tamaño del problema.

En el 2002 Toth y Vigo sugirieron que aunque la capacidad de solución de las técnicas metaheurísticas es superior que las heurísticas convencionales, los algoritmos metaheurísticos generalmente toman mayor tiempo que las heurísticas convencionales.

Las técnicas metaheurísticas pueden obtener soluciones óptimas o muy cercanas a la óptima. Algunos algoritmos metaheurísticos utilizados para obtener soluciones óptimas son: recocido simulado, búsqueda tabú.

### 2.2.8 El problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo

A continuación se presenta el problema de rutas de vehículo con ventanas de tiempo (Vehicle Routing Problem with Time Windows VRPTW) tomado de Cordone (2001). El VRPTW es una extensión del VRP donde a cada cliente se le asocia un intervalo de tiempo  $[a_i, b_i]$  en el que debe ser atendido,  $a_i$  representa el momento más temprano en que es posible atender al cliente  $i$ , si cualquier vehículo llega antes de  $a_i$  el vehículo deberá esperar;  $b_i$  es el último momento en el que el cliente  $i$  puede ser atendido. A este tipo de ventanas de tiempo se les conoce como ventanas de tiempo no flexibles. En el VRPTW todos los vehículos deben salir y regresar al lugar de origen, todos los clientes deben ser visitados una vez. El objetivo es minimizar la distancia total recorrida por la flota de vehículos.

Considere una red  $G = (N, A)$  donde  $N = \{0, 1, \dots, n\}$  es el conjunto de nodos y  $A = \{(i, j) : i, j \in N, i \neq j\}$  el conjunto de arcos. El nodo 0 representa el origen y  $N = \{1, \dots, n\}$  el conjunto de clientes, cada uno con una demanda  $q_i$ . Es posible viajar de  $i$  a  $j$ , incurriendo a un costo  $C_{ij}$  en un tiempo de recorrido  $t_{ij}$ . Cada vehículo tiene una capacidad limitada  $Q$ , y  $h$  es el costo de vehículo. Para atender a cada cliente  $i$  se requiere un tiempo de servicio  $S_i$ ,  $[a_i, b_i]$  es el intervalo de tiempo para atender al cliente  $i$  donde  $a_i = \max(a_0 + t_{0i}, a_i)$  y  $b_i = \min(b_0 + t_{i0}, b_i)$ .

Se asume que el costo depende del tiempo de recorrido, es decir,  $C_{ij} = t_{ij}, \forall (i, j) \in A$  y que  $h$  es suficientemente grande para garantizar que minimizar el número de vehículos es parte de la función objetivo.

Variables

$X_{ij} = 1$  si el vehículo va del cliente  $i$  al cliente  $j$ , y 0 en caso contrario

$y_i$  = Carga del vehículo a la salida del nodo  $i$

$P_i$  = Principio del servicio en el nodo  $i$

El VRPWT de manera general se formula de la siguiente manera:

$$\min \sum_{j \in N} hx_{oj} + \sum_{(i,j) \in A} C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

s.a :

$$\sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in N \quad (3)$$

$$P_i + S_i + t_{ij} \leq P_j \quad \forall (i, j) \in A \quad (4)$$

$$a_i \leq P_i \leq b_i \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$y_i + q_j \leq y_j \quad \forall (i, j) \in A \quad (6)$$

$$q_i \leq y_i \leq Q \quad \forall i \in N \quad (7)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (8)$$

Donde las restricciones (2) y (3) aseguran que a cada cliente se le asigna una ruta, la restricción (4) y la (5) se refieren a restricciones en la ventana de tiempo y la (6) y la (7) son restricciones de capacidad.

El VRPTW puede ser resuelto por técnicas heurísticas y metaheurísticas. Para problemas hasta 500 clientes se puede utilizar algoritmos metaheurísticos como: recocido simulado, algoritmo genético (GA) y búsqueda tabú.

### 2.2.9 El Problema de Rutas de Vehículos con Viajes Múltiples

A continuación se presenta el problema de rutas de vehículos con viajes múltiples (Vehicle Routing Problem with Multiple Trips VRPMT) tomado de Olivera (2005). El VRPMT es una extensión del VRP donde los vehículos pueden realizar varios viajes en el mismo periodo de planeación. Cuando la capacidad de los vehículos es pequeña o cuando el periodo de planeación es largo, más de una ruta por vehículo puede ser la mejor solución. En áreas urbanas, donde las distancias de viaje son relativamente cortas, es común el caso en que después de que un vehículo realizó su ruta, el vehículo sea cargado con mercancía y utilizado nuevamente.

El problema de rutas de vehículos con viajes múltiples puede ser brevemente descrito como una red  $G = (V, E)$  donde  $V = \{0, 1, \dots, N\}$  es el conjunto de nodos y  $E \subseteq V \times V$  es el conjunto de arcos. Si  $(i, j) \in E$ , entonces es posible viajar de  $i$  a  $j$ , incurriendo a un costo  $c_{ij}$  en un tiempo de recorrido  $t_{ij}$ . El nodo 0 representa al origen donde se encuentra un flota  $k = \{1, \dots, m\}$  de vehículos idénticos. Cada vehículo tiene una capacidad limitada  $Q$ . Los nodos en  $V \setminus \{0\}$  representan a los clientes, cada uno con una demanda  $q_i$ . Por último, existe un horizonte de planeación  $T$  que establece la duración del día.

El objetivo del VRPMT es determinar el conjunto de rutas y la asignar a cada ruta a un vehículo, de forma que se minimice los costos totales de las rutas y satisfaciendo las siguientes condiciones:

- A) Cada ruta comience y termine en el origen
- B) Cada cliente sea visitado por una ruta
- C) La demanda de los clientes en la misma ruta no excede a  $Q$
- D) La duración de las rutas asignadas al mismo vehículo no excede a  $T$

Una ruta será definida por una secuencia de nodos  $r = (v_0, \dots, v_{n_r} + 1)$ , donde  $v_0 = v_{n_r} + 1 = 0$  y  $(v_i, v_i + 1) \in E \forall i \in [0, n_r]$ . Para cada ruta  $r$ ,  $n_r$  es el número de clientes visitados,  $q_r = \sum_{i=1}^{n_r} q_{v_i}$  es la demanda cubierta por la ruta,  $c_r = \sum_{i=0}^{n_r} c_{v_i, v_{i+1}}$  es el costo y  $t_r = \sum_{i=0}^{n_r} t_{v_i, v_{i+1}}$  es la duración. Una ruta es factible si  $q_r \leq Q$ .

La solución es un conjunto de secuencia de rutas  $s = (R_1, \dots, R_m)$ , donde  $R_k$  contiene las rutas asignadas al vehículo  $k$ . El conjunto de rutas en la solución  $R(s) = \bigcup_{k \in K} R_k$ . El costo de la solución es:

$$f(s) = \sum_{r \in R(s)} C_r \quad (1)$$

El conjunto de rutas asignadas a cada vehículo no puede ser mayor que el horizonte de planeación (esto será llamado restricciones de exceso de tiempo).

$$O_k(s) = \left( \sum_{r \in R_k} t_r - T \right)^+ \quad (2)$$

Donde  $a^+ = \max(a, 0)$ . Finalmente el total de exceso de tiempo esta dado por:

$$O(s) = \sum_{k \in K} O_k(s) \quad (3)$$

Se deja que  $R$  sea el conjunto que contiene las rutas factibles. Para cada  $r \in R$  se define un parámetro  $a_{ir}$  que indica si la ruta  $r$  visita al cliente  $i$  ( $a_{ir} = 1$ ) o si no ( $a_{ir} = 0$ ).

El VRPMT se formula de la siguiente manera:

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{r \in R} c_r x_r^k \quad (4)$$

s.a :

$$\sum_{k \in K} \sum_{r \in R} a_{ir} x_r^k = 1, \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$\sum_{r \in R} t_r x_r^k \leq T, \quad \forall k \in K, \quad (6)$$

$$x_r^k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K, \forall r \in R$$

Si  $x_r^k = 1$ , entonces  $r$  es parte de la solución y es asignado al vehículo  $k$  ( $r \in R_k$ ). Si  $x_r^k = 0 \forall k \in K$ ,  $r$  no es parte de la solución. La función objetivo (4) establece que el costo total de las

rutas debe ser minimizado. El hecho de que cada cliente solo sea atendido por una ruta está establecido en la restricción (5) y (6) es la restricción de exceso de tiempo.

Para resolver el VRPMT se puede utilizar el algoritmo búsqueda tabú, la heurística del problema de embalaje (bin packing problem) y el algoritmo de memoria adaptativa (adapted memory).

### 2.2.10 El Problema de Rutas de Vehículos con Flota de Vehículos Heterogénea

A continuación se presenta el problema de rutas de vehículos con flota de vehículos heterogénea (Heterogeneous fleet Vehicle Routing Problem HVRP) tomado de Choi-Tcha (2007). El HVRP es una variación del VRP donde se tiene una flota de vehículos con diferentes capacidades y diferentes costos fijos y variables. El HVRP determina el diseño de un conjunto de rutas de vehículos, de una flota de vehículos heterogénea, para atender a un conjunto de clientes con demandas conocidas. Cada cliente debe ser visitado una sola vez, y la demanda total de la ruta no excede la capacidad del vehículo que es asignado.

Se considera una red  $G = (N, A)$ , con un conjunto de arcos  $A$  y un conjunto de  $N$  nodos donde 0 es el origen y  $1, \dots, N$  los clientes. Los clientes  $i$  tienen una demanda conocida  $q_i$ ,  $i \in N \setminus \{0\}$ . Hay varios de tipos de vehículos  $T = \{1, \dots, m\}$ . Cada tipo de vehículo  $k \in T$  tiene una capacidad  $b_k$ , con costos fijos  $f_k$ , y costos variables por unidad de distancia  $g_k$ . El número de vehículos disponibles se asume que es ilimitado. El costo de los tipos de vehículos  $k \in T$  que atraviesa un arco  $(i, j) \in A$  es  $c_{ij}^k$  el cual se obtiene multiplicando la distancia  $l_{ij}$  del arco y el costo variable  $g_k$ . El costo de la ruta  $r$  tomada por un tipo de vehículo  $k$  es obtenido por  $f_k$  más la suma del  $c_{ij}^k$  por cada arco  $(i, j)$  a lo largo de la ruta  $r$ , el cual puede ser referido como el conjunto ordenado de costos de la ruta de vehículo  $(r, k)$ .

Un conjunto ordenado de rutas de vehículos,  $(r, k)$  es factible cuando la ruta  $r$  comienza y termina en el origen, y la suma de demandas de los nodos en la ruta  $r$  no excede la capacidad del tipo de vehículo  $k$ . Se deja  $R$  que sea el conjunto factible de conjuntos ordenados de rutas de vehículos. Suponga  $R_k$  que sea el conjunto ordenado de rutas de vehículos del tipo  $k$ , con  $\bigcup_{k \in T} R_k = R$ . Suponga  $c_r^k$  que sea el conjunto ordenado del costo de rutas de vehículos  $(r, k) \in R$ . Para un conjunto ordenado  $(r, k)$  factible, se define:

$$\delta_{ir}^k = \begin{cases} 1 & \text{si el tipo de vehículo } k \text{ visita a un cliente } i \text{ en una ruta } r \text{ y } 0 \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

El HVRP se puede formular de la siguiente manera:

$$\min \sum_{k \in T} \sum_{r \in R_k} c_r^k x_r^k \quad (1)$$

s.a :

$$\sum_{k \in T} \sum_{r \in R_k} \delta_{ir}^k x_r^k \geq 1 \quad \forall i \in N \setminus \{0\} \quad (2)$$

$$\sum_{r \in R_k} x_r^k = y_k \quad \forall k \in T \quad (3)$$

$$x_r^k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in T, r \in R_k \quad (4)$$

$$y_k \geq 0, \text{ entera} \quad \forall k \in T \quad (5)$$

---

La decisión binaria  $x_r^k = 1$  si un conjunto ordenado de rutas de vehículos  $(r, k)$  es utilizada y 0 en caso contrario. La decisión de la variable entera  $y_k$  define el tipo  $k$  de vehículos utilizado. El objetivo es minimizar el costo total de todos los conjuntos ordenados de rutas de vehículos. La restricción (2) asegura que cada cliente sea asignado al menos a un conjunto ordenado de rutas de vehículos. Las restricciones (3) y (5) indican que el número empleado de vehículos es entero.

El HVRP se puede resolver con técnicas heurísticas y metaheurísticas como: búsqueda tabú.

## **2.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

Los sistemas de información geográfica (SIG) son herramientas informáticas que procesan los datos con alguna componente espacial. Una característica fundamental de los SIG es que trabajan con mapas y a diferencia de otros programas que también lo hacen como los de topografía, los de cartografía digital y los sistemas CAD/CAM, los SIG pueden realizar operaciones de análisis espacial, bastante sofisticadas en algunos casos, utilizando los datos espaciales y sus atributos almacenados en el propio sistema, que permiten obtener nuevos mapas a partir de única fuente de datos (Bruce, 2001).

### **2.3.1 Introducción**

De acuerdo a Bruce (2001) La tecnología SIG es de uso aplicado y sus posibilidades de utilización están en cualquier actividad que requiera un proceso de conformación espacial. Los campos tradicionales de aplicación han sido la gestión catastral y de propiedad urbana, el medio ambiente, la planificación urbana y el control de grandes redes (telecomunicaciones, gas, agua, electricidad, etc.). No obstante, en la actualidad, su uso está extendido a ámbitos como la gestión de negocios, la arqueología, el análisis histórico, la epidemiología, entre otros, es decir, cualquier campo científico, técnico, empresarial, etc., en el que se trabaje con datos espaciales.

La actual expansión en la utilización de esta tecnología ha generado la necesidad de su conocimiento por parte de gestores de empresas y organizaciones públicas ya que de alguna manera, el manejo de información actualizada supone un control sobre la organización. La introducción de un SIG implica un cambio en el flujo de la información desde el centro de toma de datos al administrador del sistema, desplazándose, por tanto los centros de decisión. Quizás ésta sea una de las razones por las que existen ciertas reticencias en los sectores menos evolucionados de las organizaciones para la implantación de estas tecnologías.

El principal problema que puede llegar a plantear la utilización de los SIG es precisamente consecuencia de la facilidad de su manejo, lo cual posibilita que usuarios sin conocimientos suficientes sobre la naturaleza de los datos geográficos y sobre las funciones de análisis que incorporan, puedan utilizar estas herramientas y obtener resultados aparentemente correctos, presentados como listados numéricos o mapas incuestionables, pero con escaso valor científico-técnico. Por otro lado, los organismos responsables de la infraestructura cartográfica de los países más desarrollados, disponen de información digital y bases de datos accesibles al gran público, que son, al fin y al cabo, el alimento de los SIG, evitándose de esta manera uno de los cuellos de botella que supone la carga de datos en un SIG y que, en ocasiones, hace inevitable su utilización en organizaciones pequeñas y en proyectos con presupuestos pequeños.

### **2.3.2 Valor de la Información**

El precio de la información de acuerdo a Bruce (2001) se relaciona con la cantidad en dinero que podría valer. Frecuentemente el precio parece ser alto, pero podría ser bajo en términos de costo-beneficio. (Una imagen satelital podría tener un precio elevado unitario, sin embargo los datos son de una gran área y pueden servir para múltiples propósitos).

El costo de la información incluye mucho más que el precio de la información, podría incluir la maquinaria necesaria para procesar la información, las personas que la utilizan, las personas que dan soporte técnico a la organización, y muchos otros elementos. El costo es la suma total de la inversión:

precio, gente, instalaciones, esfuerzo, tiempo y otros. Estos ingredientes son los que constituyen la infraestructura de la implementación y el mantenimiento de los SIG.

Posiblemente una de las preguntas más importantes es el costo de “la no información”. La cantidad que tendríamos que pagar por no contar con la información crítica a la hora de tomar decisiones.

**2.3.3 Visualización de los Datos**

La visualización según Bruce (2001) es la presentación de los datos en forma gráfica, donde las tablas y las listas de números son normalmente difíciles de entender sin estudiarlas a detalle, la visualización es utilizada convenientemente para comunicar información compleja. La figura 2.2 muestra dos diferentes acomodos de datos. Ambos dicen lo mismo, uno está representado por datos numéricos en forma de tabla, y el otro es un mapa. ¿Cuál de los dos ayuda más a entender los datos? El mapa muestra los datos de manera visual, inicialmente es más fácil entender el mapa, además de que con los mismos datos se puede obtener información adicional como la colindancia de delegaciones, o hacia donde se encuentra la mayor concentración de Estaciones de Servicio. La tabla puede ser mejor para el análisis detallado.

Delegación	Gasolineras
A. Obregón	19
Azcapotzalco	15
B. Juárez	36
Coyoacán	24
Cuajimalpa	6
Cuauhtémoc	49
Gustavo A. Madero	31
Iztacalco	11
Iztapalapa	53
La Magdalena Contreras	2
M. Hidalgo	31
Milpa Alta	2
Tláhuac	2
Tlalpan	8
V. Carranza	25
Xochimilco	5
Total	319

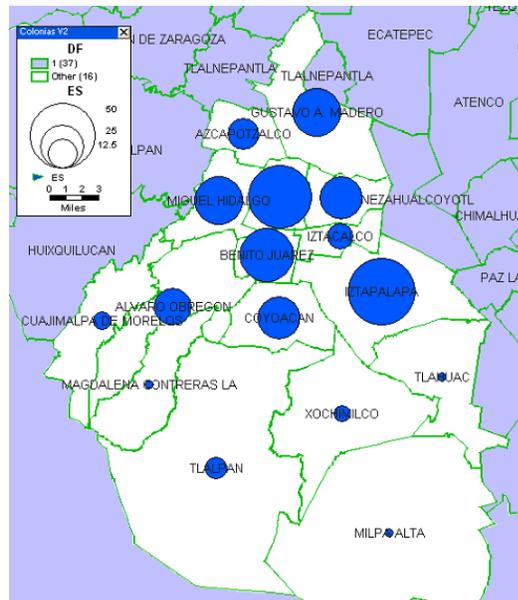


Figura 2.2 Número de gasolineras por delegación  
Fuente: Elaboración propia

La computación ayuda a la visualización, ofreciendo técnicas sofisticadas de colocación de datos para hacerlas más entendibles a la hora de desplegarla. Actualmente hay múltiples Sistemas de Información con visualización mediante mapas.

**2.3.4 Definición de los SIG**

Un sistema de información es un conjunto de elementos ordenadamente relacionados entre sí de acuerdo a ciertas reglas. Sus principales elementos son: contenido, equipo básico, equipo lógico, administrador y usuarios (Lantada, 2002).

A continuación se muestran algunas de las definiciones más importantes de acuerdo a Lantada (2002): En 1986 Cebrian los define como, “Bases de datos computarizadas que contienen información espacial”.

---

En 1996 Aronof los define como, “Un sistema basado en ordenador que proporciona los cuatro siguientes conjuntos de capacidades para el manejo de los datos georreferenciados: entrada de datos, gestión de los datos, manipulación, análisis y salida de los datos.

### **2.3.5 Componentes de un SIG**

Los componentes espaciales de un SIG según Ordoñez (2003) son los siguientes: una base de datos para almacenar datos geográficos y sus atributos, un sistema administrador de bases de datos, un sistema de digitalización de mapas, un sistema de representación cartográfica y un sistema de análisis geográfico. Aparte de esto, algunos SIG incorporan sistemas de tratamiento de imágenes y de análisis estadístico.

Como es lógico, no todos estos componentes son esenciales, ni su grado de desarrollo y capacidad son iguales en todos los SIG, sino que algunos de estos componentes son más completos y avanzados en unos sistemas que en otros.

#### **A) Base de datos espaciales y temáticos**

El núcleo central del sistema lo constituyen las bases de datos espaciales y temáticos, en los que se almacena de forma estructurada los objetos cartográficos (su posición, tamaño y forma) y sus características no geométricas (atributos), respectivamente. Así en un mapa parcelario la forma y la situación de las parcelas estaría en la base de datos espaciales, mientras que la información relativa a los propietarios, tipo de uso, etc. estaría en la base de datos temáticos.

#### **B) Sistema administrador de bases de datos (DBMS)**

Un sistema gestor de bases de datos es un tipo de software usado para gestionar y analizar los datos almacenados en una base. Desde estos sistemas se pueden almacenar los datos en las tablas, establecer relaciones entre ellos y crear nuevas tablas con los resultados obtenidos. Estas tablas se pueden relacionar con la base de datos espacial y representar el resultado en forma de mapas temáticos.

#### **C) Sistema de digitalización de mapas**

Las bases de datos cartográficas de los SIG se construyen a partir de los mapas, fotografías o imágenes que conforman los datos de partida. Para cargar estos datos en la base de datos del SIG, es necesario convertirlos al formato digital propio del sistema, para lo cual se utilizan programas de digitalización y de conversión de formatos. La digitalización de los mapas analógicos se puede hacer con una tableta digitalizadora y el software correspondiente, o introduciendo en la computadora los mapas escaneados y digitalizándolos posteriormente en la pantalla. Los escáner también se utilizan para obtener información digital en formato raster a partir de mapas y fotos que puede ser empleada directamente por los SIG que utilizan este tipo de datos (SIG raster).

#### **D) Sistemas de representación cartográfica**

Son los que permiten dibujar mapas a partir de los elementos seleccionados de las bases de datos, hacer distintas composiciones cartográficas y también enviar estos mapas a los dispositivos de salida, como impresoras o plotters.

#### **E) Sistema de análisis geográfico**

Este sistema permite relacionar datos espaciales y obtener nuevos mapas en función de una relación establecida. Por ejemplo se obtiene un mapa con las zonas donde se cumple una serie de condiciones de índole espacial, como por ejemplo, áreas residenciales ubicadas sobre materiales geológicos con un alto contenido en sustancias radioactivas. En este caso, se clasifica, en primer lugar, los distintos materiales geológicos en función de sus emisiones

radioactivas, se obtiene un mapa que se superpone a un mapa de áreas residenciales, a su vez, se hace una reclasificación de un mapa de usos de suelos. La relación espacial que se establece entre estos dos mapas es de coincidencia de coordenadas, representa únicamente las áreas en las que se cumple esta condición. Éste es un problema típico que no se puede resolver un sistema de bases de datos convencional, ya que no puede realizar superposiciones de datos espaciales.

**F) Sistema de procesamiento de imágenes**

Algunos SIG disponen de módulos para analizar y operar imágenes obtenidas con sensores aerotransportados o desde satélites.

Las imágenes procedentes de satélite se emplean como fuentes de datos en los sistemas de información geográfica, especialmente en el análisis y resolución de problemas.

**2.3.6 Tipos de Datos de Los SIG**

A continuación se muestran los tipos de SIG en función del tipo de datos de los SIG tomados de <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>. Existen tres grandes grupos: SIG Vectoriales, SIG Raster y SIG con modelo de datos Orientados a Objetos (Ver figura 2.3).

Los SIG vectoriales utilizan vectores (básicamente líneas), para delimitar los objetos geográficos, mientras que los SIG raster utilizan una retícula regular para documentar los elementos geográficos que tienen lugar en el espacio.

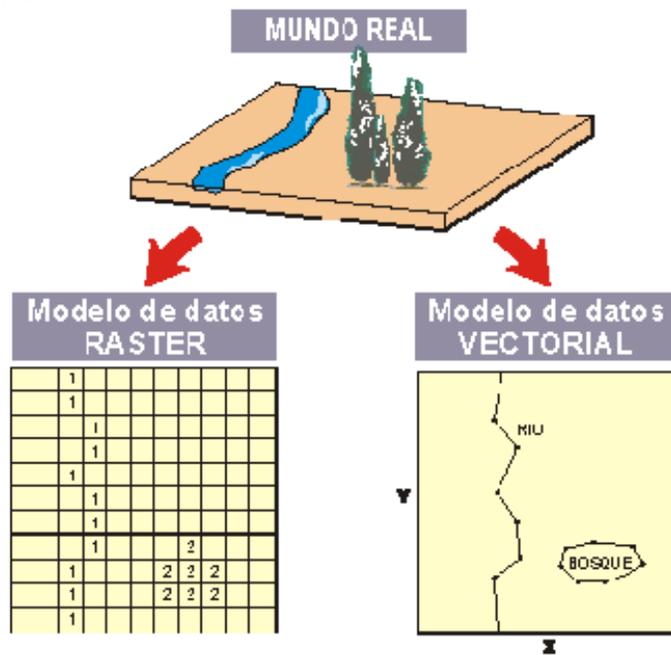


Figura 2.3 Principales tipos de SIG  
Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>

**A) Los SIG vectoriales**

Son aquellos SIG que para la descripción de los objetos geográficos utilizan vectores definidos por pares de coordenadas relativas a algún sistema cartográfico (<http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>).

Con un par de coordenadas y su altitud gestionan un punto. (Un vértice geodésico), con dos puntos generan una línea, y con una agrupación de líneas forman polígonos. De todos los métodos para formar topología vectorial la forma más robusta es la topología arco-nodo, cuya lógica de funcionamiento se muestra en la figura 2.4

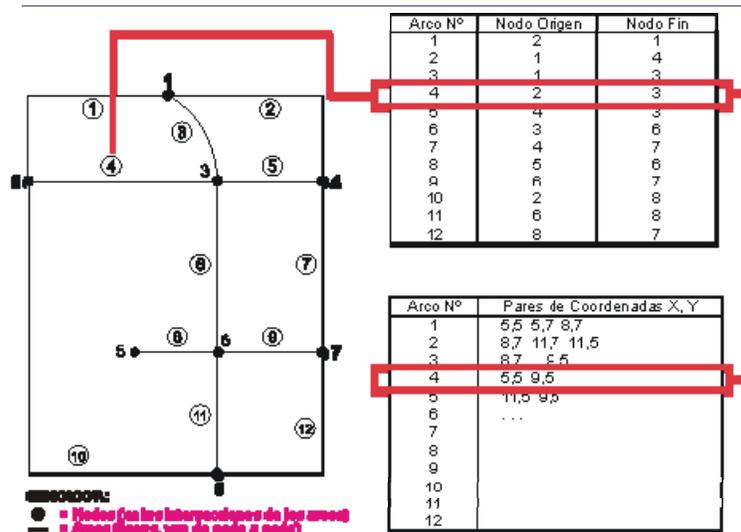


Figura 2.4 Formación de topología vectorial  
 Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>

La topología arco-nodo basa la estructura de toda la información geográfica en pares de coordenadas, que son la entidad básica de información para este modelo de datos. Con pares de coordenadas (puntos) se forma vértices y nodos, y con agrupaciones de estos puntos se forma líneas, con las que a su vez se forma polígonos.

Para poder implementarlo en una computadora, se requiere la interconexión de varias bases de datos a través de identificadores comunes. Estas bases de datos, que son como tablas con datos ordenados de forma tabular, contienen columnas comunes a partir de las cuales se puede relacionar datos no comunes entre una y otra tabla.

En la figura 2.4 se muestra cómo se forman las líneas a partir de puntos (pares de coordenadas). En la figura 2.5 se muestra cómo se forman los polígonos a partir de la agrupación de líneas:

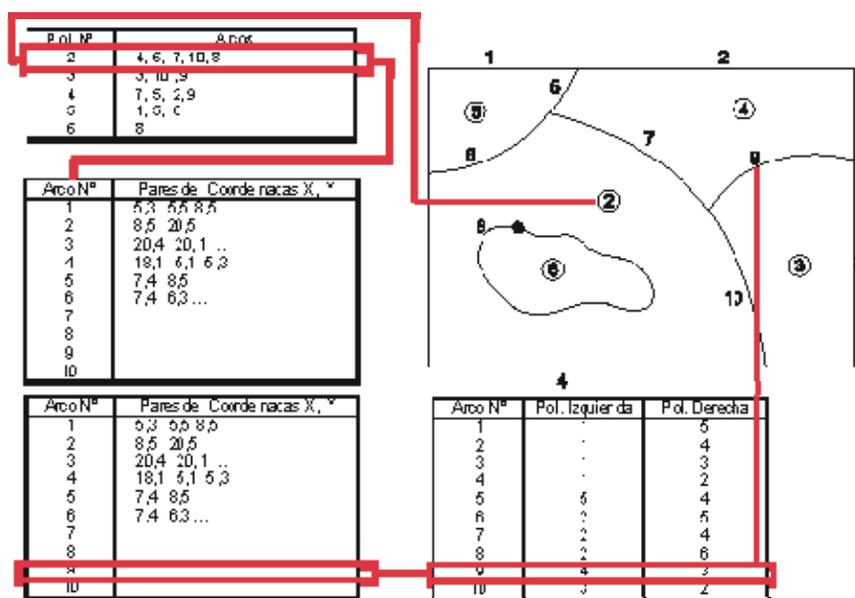


Figura 2.4 Formación de polígonos en la topología vectorial  
 Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>

En general, el modelo de datos vectorial es adecuado cuando se trabaja con objetos geográficos con límites bien establecidos, como pueden ser fincas, carreteras, etc.

### B) Los SIG raster

Los SIG Raster basan su funcionalidad en una concepción implícita de las relaciones de vecindad entre los objetos geográficos. Su forma de proceder es dividir la zona de la base de datos en una retícula o malla regular de pequeñas celdas (que se denomina píxeles) y se atribuye un valor numérico a cada celda como representación de su valor temático. Dado que la malla es regular, el tamaño del píxel es constante y se conoce la posición en coordenadas del centro de una de las celdas, se puede decir que todos los píxeles están georreferenciados.

Lógicamente, para tener una descripción precisa de los objetos geográficos contenidos en la base de datos el tamaño del píxel debe de ser reducido (en función de la escala), lo que dotará a la malla de una alta resolución. Sin embargo, a mayor número de filas y columnas en la malla (más resolución), mayor esfuerzo en el proceso de captura de la información y mayor costo computacional a la hora de procesar la misma (Ver. Fig 2.6).

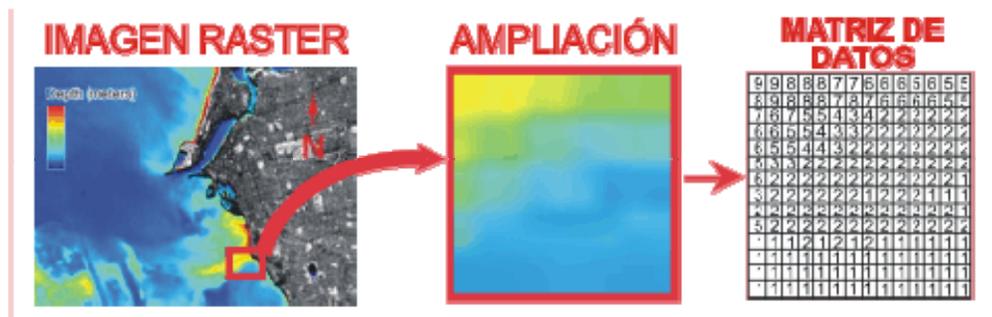


Figura 2.6 Organización de la información en el modelo Raster

Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>

No obstante, el modelo de datos raster es especialmente útil cuando se describe objetos geográficos con límites difusos, como por ejemplo la dispersión de una nube de contaminantes, o los niveles de contaminación de un acuífero subterráneo, donde los contornos no son absolutamente nítidos; en esos casos, el modelo raster es más apropiado que el vectorial.

### C) Los SIG orientados a objetos

Los SIG orientados a objetos plantean un cambio en la concepción de la estructura de las bases de datos geográficas; mientras los modelos de datos vectorial y raster estructuran su información mediante capas, los sistemas orientados a objetos intentan organizar la información geográfica a partir del propio objeto geográfico y sus relaciones con otros (Ver figura 2.7). De este modo, los objetos geográficos están sometidos a una serie de procesos y se agrupan en clases entre las cuales se da la herencia.

Los SIG orientados a objetos introducen un carácter dinámico a la información incluida en el sistema, frente a los modelos de datos vectoriales y raster que tienen un carácter estático.

Por ello, el modelo orientado a objetos es más aconsejable para situaciones en las que la naturaleza de los objetos que tratamos de modelar es cambiante en el tiempo y/o en el espacio.

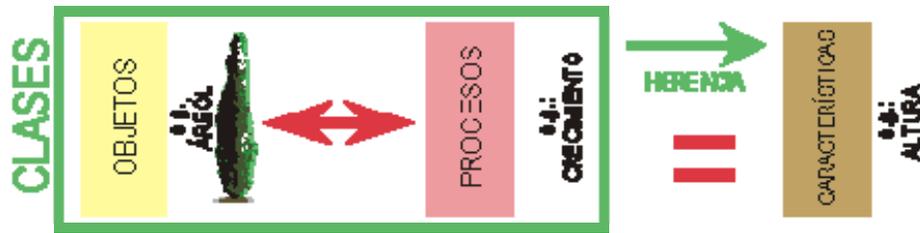


Figura 2.7 Organización de la información en el orientado a objetos  
 Fuente: <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>

Por ejemplo, En un subcompartimento forestal, dentro del cual se dan muchos árboles, cada uno de ellos es sometido a diferentes procesos (por ejemplo el crecimiento); este crecimiento es heredado por el subcompartimento y da como resultado que la altura del mismo sea cambiante con el tiempo.

Por lo tanto, en este caso los atributos temáticos de cada objeto geográfico son el resultado de aplicar determinadas funciones que varían según las relaciones del objeto de referencia con su entorno.

Este modelo de datos es más aconsejable que cualquier otro para trabajar con datos geográficos, pero se encuentra con dificultades de implementación en los actuales Sistemas de Gestión de Bases de Datos (SGBD), y por lo tanto también con dificultades de implementación en los SIG. Hoy en día comienzan a verse implementaciones de este tipo de organización de datos en algunos SIG comerciales.

La ventaja fundamental que permite esta estructura de datos frente a las demás es la dinamicidad de los datos. Es decir, a partir de una serie de parámetros establecidos en el comportamiento de los objetos geográficos, se puede simular su evolución futura, lo que constituye un gran avance si se trabaja en entornos en los que se requiere simulación de situaciones potenciales.

### 2.3.7 Disciplinas Relacionadas

A continuación se presentan algunas disciplinas relacionadas con los SIG según Bernhardsen, (1999).

El desarrollo de los SIG ha sido posible gracias a los avances de otras disciplinas, como: geografía, cartografía, ingeniería civil, estadística, ciencias de la computación, investigación de operaciones, inteligencia artificial, demografía, y otras ramas de las ciencias sociales, de las ciencias naturales, y de la ingeniería.

El poder de los SIG es que posee varias aplicaciones en diversas disciplinas. Una de las muchas industrias que se ha beneficiado de los SIG es la logística. Los SIG tienen el poder de incrementar las ganancias de los comercios, ayudándolos a administrar sus recursos de una manera geográfica.

La capacidad de separar información en capas, y combinarlas con otras capas de información es la razón principal por la cual los SIG muestran un gran potencial como herramientas de investigación y de toma de decisiones.

Otro potencial de los SIG se halla en el análisis de negocios y mercados, basado en un modelo geo-demográfico. La repentina relación de los datos geográficos con los datos de los negocios ha permitido a los administradores visualizar, analizar, y optimizar el "dónde" de sus negocios con respuestas a preguntas tales como: ¿Dónde están mis mejores mercados?, ¿Dónde está mi competencia?, ¿Dónde debemos promocionar nuestros productos? Esto permitirá, a los administradores, responder al "qué", "cómo", y "por qué" del análisis de mercado.

Los SIG se pueden utilizar en diversas áreas tales como la creación de mapas, planeación regional y urbana, planeación y administración del uso del suelo, administración de recursos naturales, estudios de impacto ambiental. Algunas aplicaciones comunes de los SIG se encuentran en las siguientes áreas.

- Operación y mantenimiento
- Administración de los recursos naturales
- Planeación y desarrollo
- Administración de los servicios públicos

- Seguridad marítima
- Usos militares
- Transporte terrestre

## 2.4 LOS SIG PARA EL TRANSPORTE

Los sistemas información geográficos para el transporte SIG-T utilizan los principios y las aplicaciones de las tecnologías de información geográficos a los problemas de transporte. (Shaw, 2006).

La investigación sobre los SIG-T puede ser vista desde dos enfoques con direcciones diferentes pero complementarias.

Algunas investigaciones sobre SIG-T se enfocan en cómo los SIG pueden desarrollarse más para encontrar aplicaciones a las necesidades del transporte, y otras investigaciones se enfocan a cómo utilizar los SIG para facilitar y mejorar los estudios del transporte (Shaw, 2002). En general los temas relacionados con los SIG-T se pueden agrupar en tres categorías:

- A) Representación de datos. ¿Cómo se pueden representar varios componentes en un SIG-T?
- B) Análisis y modelado. ¿Cómo pueden las metodologías del transporte ser utilizadas en los SIG-T?
- C) Aplicaciones. ¿Qué tipos de aplicaciones son particularmente adecuadas para los SIG-T?

### 2.4.1 Análisis y Modelado de los SIG-T

A continuación se presentan un análisis de funciones y aplicaciones de los SIG-T tomadas de Thill (2000).

Los SIG-T se han beneficiado de muchas de las funciones estándares de los SIG, (consulta, geocodificación, amortiguación, superposición, etc.) para apoyar la administración, análisis y visualización de datos. Al igual que en otros campos, el transporte ha desarrollado sus propios métodos y modelos de análisis. Algunos ejemplos incluyen los algoritmos de la ruta más corta (el problema del agente viajero, problemas de rutas de vehículos), modelos de interacción espacial (el modelo de gravedad), problemas de flujo en la red (equilibrio óptimo de usuarios, sistema óptimo de equilibrio, equilibrio dinámico), problemas de ubicación de instalaciones (problema de p-centros, problema p-mediana, problema p-máxima), modelos de demanda de viajes (distribución de viaje, distribución de transporte modal y modelos de asignación de tráfico) y el uso de modelos interactivos del uso de suelo. Los SIG-T son uno de los principales campos de aplicación de los SIG. Muchas aplicaciones de los SIG-T han sido implementadas en diversas agencias de transporte en las últimas décadas. Abarcan gran parte de la amplia gama de transporte, como la planeación de la infraestructura, diseño y administración del transporte, análisis de la seguridad del transporte, análisis de la demanda de viajes, monitoreo de tráfico, control de tráfico, planeación del transporte público y la planificación de sus operaciones, evaluación del impacto ambiental, mitigación de riesgos y los sistemas de transporte inteligente.

Con el rápido crecimiento de las comunicaciones inalámbricas y el Internet en los últimos años se han encontrado aplicaciones a los SIG-T basados en estas tecnologías. Estas aplicaciones han sido comúnmente utilizadas en los sistemas de transporte inteligente y servicios de localización. Otra tendencia que se ha observado en los últimos años son las aplicaciones de los SIG-T en el sector privado, particularmente en las aplicaciones de logística. Dado que muchas empresas tienen operaciones en ubicaciones geográficas dispersas (proveedores, centros de distribución, almacenes, puntos de venta), los SIG-T pueden ser útiles para una gran cantidad de aplicaciones logísticas.

### 2.4.2 TransCAD©

A continuación se presentan algunas de las principales características de TransCad tomadas de [www.caliper.com](http://www.caliper.com).

---

TransCAD© es un SIG diseñado especialmente para transporte con el objeto de almacenar, mostrar, y analizar datos de transporte. Combina en una sola plataforma integrada las propiedades de un SIG y las capacidades de modelación del transporte como:

- A) Redes de transporte
- B) Matrices
- C) Rutas y sistemas de ruta
- D) Datos con referencias lineales

Puede usarse para todos los modos de transporte y a cualquier escala geográfica o nivel de detalle.

Proporciona una plataforma SIG con extensiones específicas para modelos de transporte. Herramientas de análisis diseñadas para el transporte, mapeo y visualización. Aplicaciones para módulos de creación de rutas, previsión de la demanda de viajes, transporte público, logística y gestión del territorio.

Permite la creación y adaptación de mapas, construir y mantener bases de datos geográficos y realizar diferentes tipos de análisis espacial. Incluye características SIG como el diseño de polígonos, áreas de influencia de líneas, y geocodificación, y tiene una arquitectura de sistema abierto que permite el almacenamiento compartido de datos.

Se puede utilizar los módulos de aplicaciones para resolver asignaciones de ruta, casos de logística y otros problemas de transporte con mayor facilidad. Las redes y matrices pueden ser de tamaño casi ilimitado.

Las redes de transporte son estructuras de datos especializadas que gobiernan los flujos sobre una red. Las redes se guardan de una manera que permiten resolver problemas de asignación de ruta. Las redes pueden incluir características detalladas como:

- A) Restricciones o penalización de giros
- B) Pasos elevados, pasos inferiores y tramos de sentido único
- C) Intersección y atributos de la unión
- D) Terminales intermodales, puntos de transferencia y funciones de retraso
- E) Conectores de los centroides de zona
- F) Clasificaciones de tramos
- G) El acceso del tráfico y su salida

La información se guarda en matrices que contienen datos tales como flujos del origen-destino, distancia, costos, tiempos de viaje, esenciales para muchas aplicaciones de transporte. Proporciona las funciones para crear y realizar operaciones con matrices, así como herramientas para el análisis espacial y la visualización avanzada de datos. Este hecho permite ver y entender los flujos de transporte y las características de la red, (Ver figura 2.8) bajo nuevos e innovadores enfoques.

Las Rutas y Sistemas de Ruta indican caminos tomados por los camiones, ferrocarriles, automóviles, autobuses que viajan de un lugar a otro. Incluye las herramientas para crear, mostrar, revisar y modificar las rutas, así como una tecnología exclusiva de mapeo para trazar las rutas con un claro diseño.

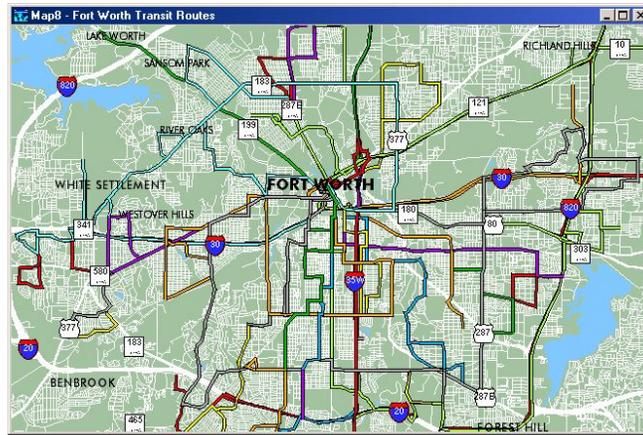


Figura 2.8 Visualización de flujos de transporte  
Fuente: [www.caliper.com](http://www.caliper.com)

La referencia lineal identifica la situación de rasgos de transporte como una distancia de un punto fijo a lo largo de una ruta. Puede mostrar y analizar estos juegos de datos sin conversión, e incluye la segmentación dinámica de funciones para unir y analizar múltiples juegos de datos referenciados linealmente.

Una de las desventajas de TransCAD es que no da información sobre la técnica empleada de resolución para problemas de redes de transporte (frecuentemente heurísticas), de manera que no permite comparar los resultados obtenidos por Transcad con alguna otra técnica de solución o saber que tan cerca o lejos se está de la solución óptima. Otra desventaja es que sólo cuenta con algoritmos para las variantes más sencillas de los principales problemas de transporte.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGÍA

#### 3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se centra en los procedimientos para analizar el transporte de gasolinas en la ciudad de México. En la primera parte se describe la zona de estudio seleccionada con sus principales características. En la segunda parte se explica cómo se integra y organiza la información relacionada con el transporte de gasolinas. Por último se determina el tipo de modelo empleado y se explican los pasos para la aplicación del modelo y el cálculo de la población expuesta en TransCAD.

#### 3.2 ZONA DE ESTUDIO

La zona noroeste del Distrito Federal, que incluye las delegaciones Iztacalco, Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero, se estableció como zona de estudio para realizar el análisis de distribución de gasolinas, porque esta zona es la más representativa y compleja debido a sus características demográficas, alta concentración de estaciones de servicio y que es abastecida desde una misma fuente. Adicionalmente, la información con la que se cuenta de esta zona, es la más completa en cuanto a: distribución de población, vialidades y suministro de gasolinas (Ver figura 3.1).

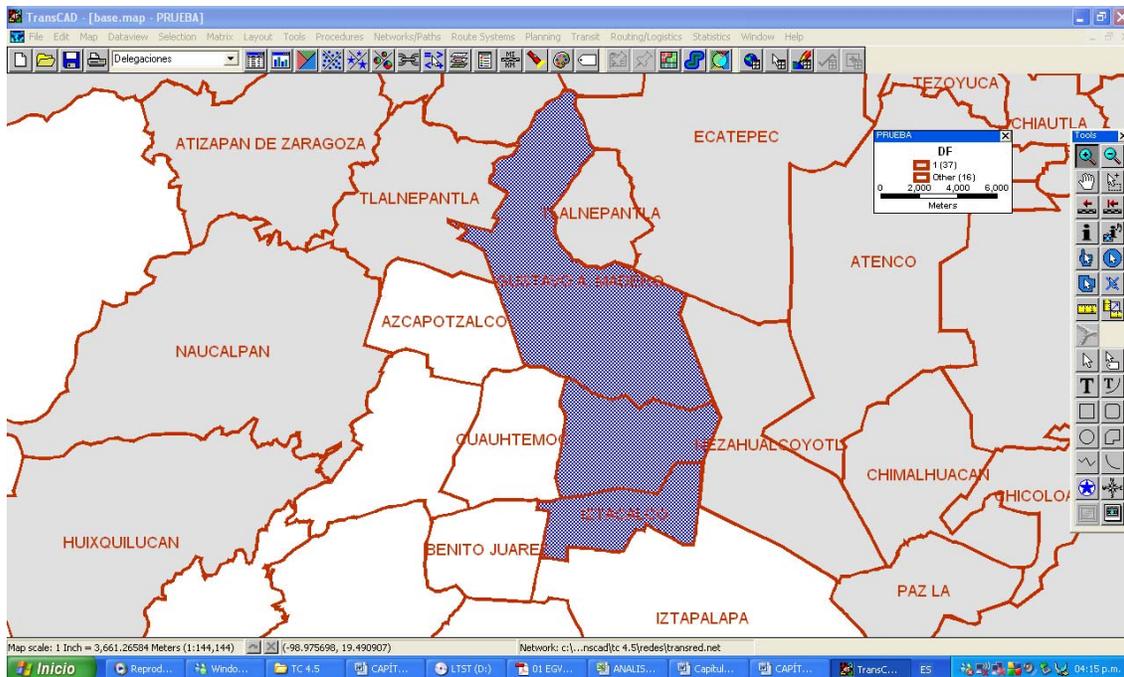


Figura 3.1 Selección de zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 3.2.1 Descripción de la Zona de Estudio

En la figura 3.2 se muestra la distribución geográfica de las 80 estaciones de servicio en la zona de estudio, las cuales son abastecidas desde la TAD norte San Juan Ixhuantepec (ubicada al norte en Tlalnepantla).

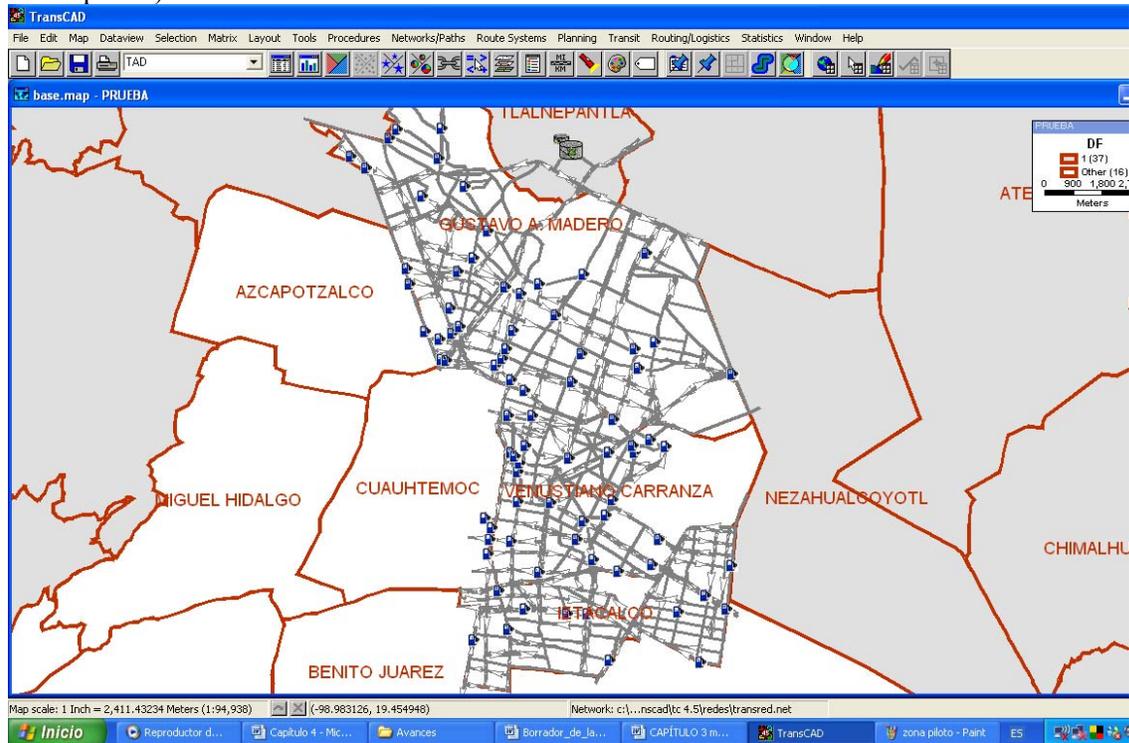


Figura 3.2 Descripción de la distribución en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En la tabla 3.1 se muestra la población que reside en esta zona.

Delegación	Población
Iztacalco	395,025
Venustiano Carranza	447,459
Gustavo A. Madero	1'193,161
<b>Total</b>	<b>2'035,645</b>

Tabla 3.1 Población en la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia con datos del SCINCE 2005 del INEGI

### 3.3 ORGANIZACIÓN DE LOS DATOS

En TransCAD la información se organiza por medio de capas para facilitar su administración y visualización. Cada capa de información está integrada por una base de datos referenciada espacialmente.

#### 3.3.1 Capas de Información

Para la realización de este estudio se recolectó información de diversas fuentes y se organizó de la siguiente forma:

**A) Traza urbana.** En la figura 3.3 se muestra la capa de la traza urbana. Esta capa contiene la información geográfica de las manzanas, además de los nombres de las calles, colonias, y delegaciones.

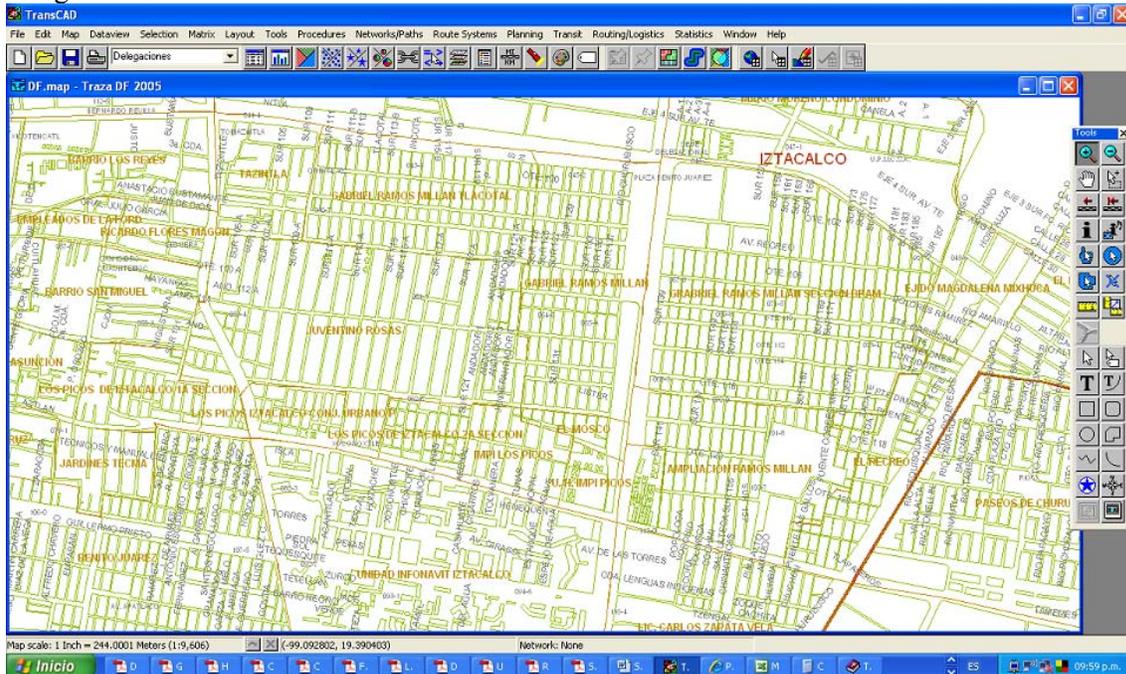


Figura 3.3 Capa de traza urbana con información del SCINCE 2005

Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

**B) Destinos.** Esta capa de información fue elaborada a partir de la base de datos de verificación de funcionamiento de gasolineras de la Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO). De esta base se obtuvo la dirección, razón social y el número de mangueras, de cada estación de servicio (Ver figura 3.4). La información de cada una de las estaciones de servicio fue integrada como un punto, en una capa geográfica ligada a la base de datos de sus atributos.

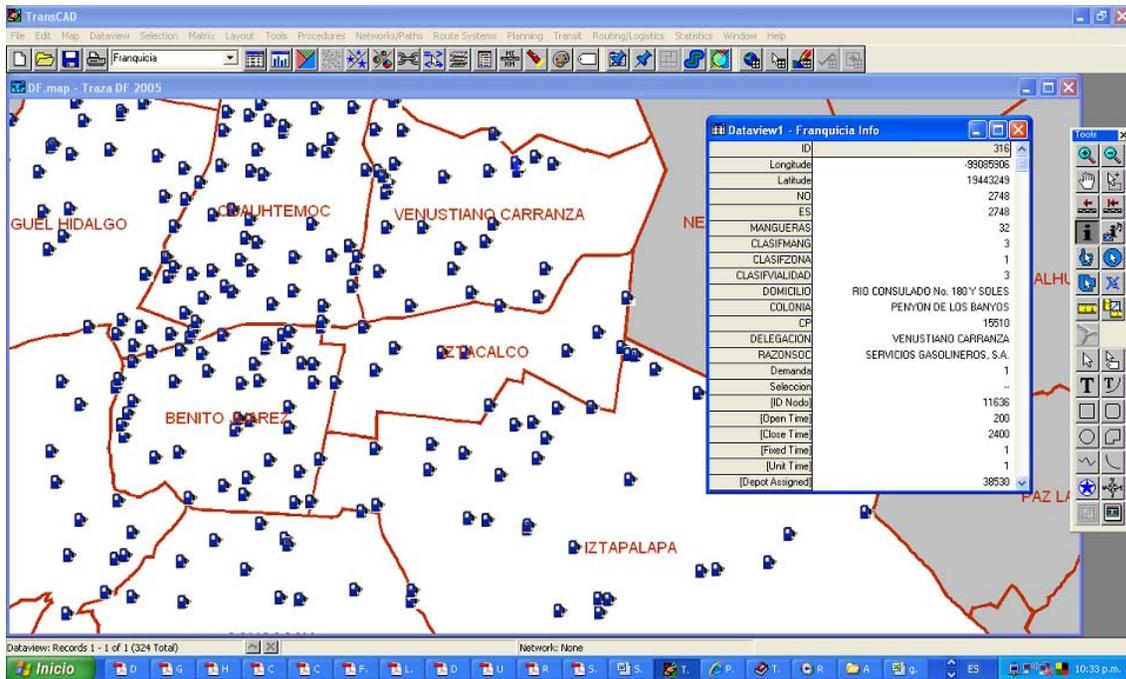


Figura 3.4 Capa de destinos  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

**C) Orígenes.** Esta capa de información fue elaborada a partir de la información de Pemex Refinación (Ver figura 3.5). La información de cada TAD fue integrada como un punto.

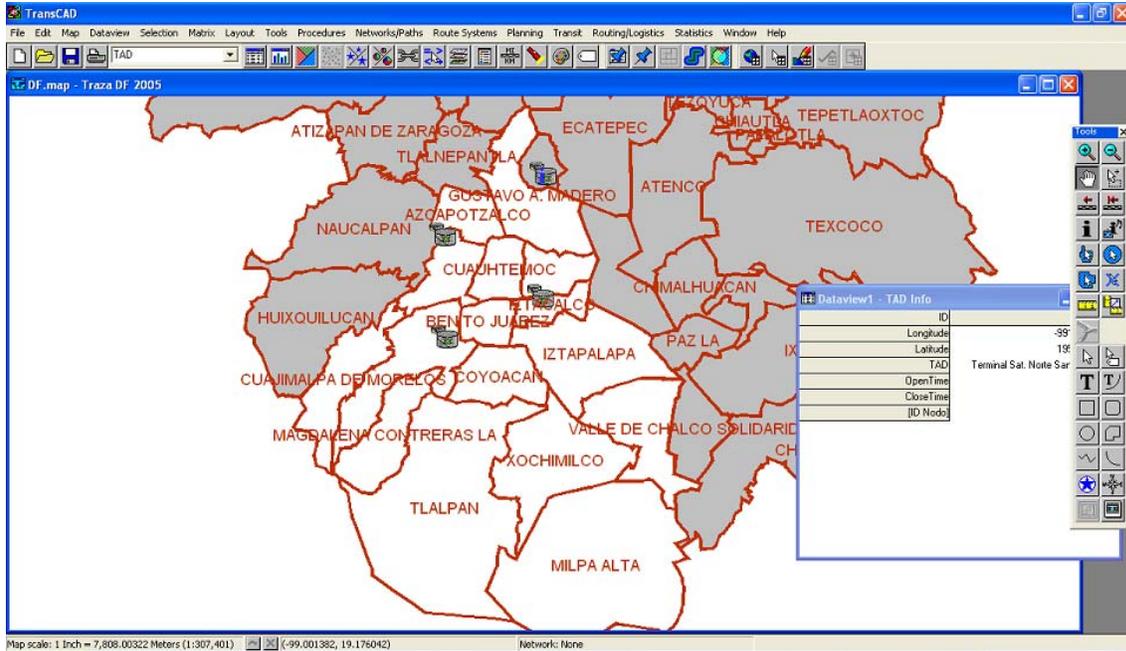


Figura 3.5 Capa de orígenes  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

**D) Población.** Esta capa contiene la población por AGEBS (Áreas Geoestadísticas Básicas) obtenida del SCINCE 2005, INEGI. La información fue integrada en una capa de polígonos. La Figura 3.6 muestra la densidad de población (población/área) por AGEBS.

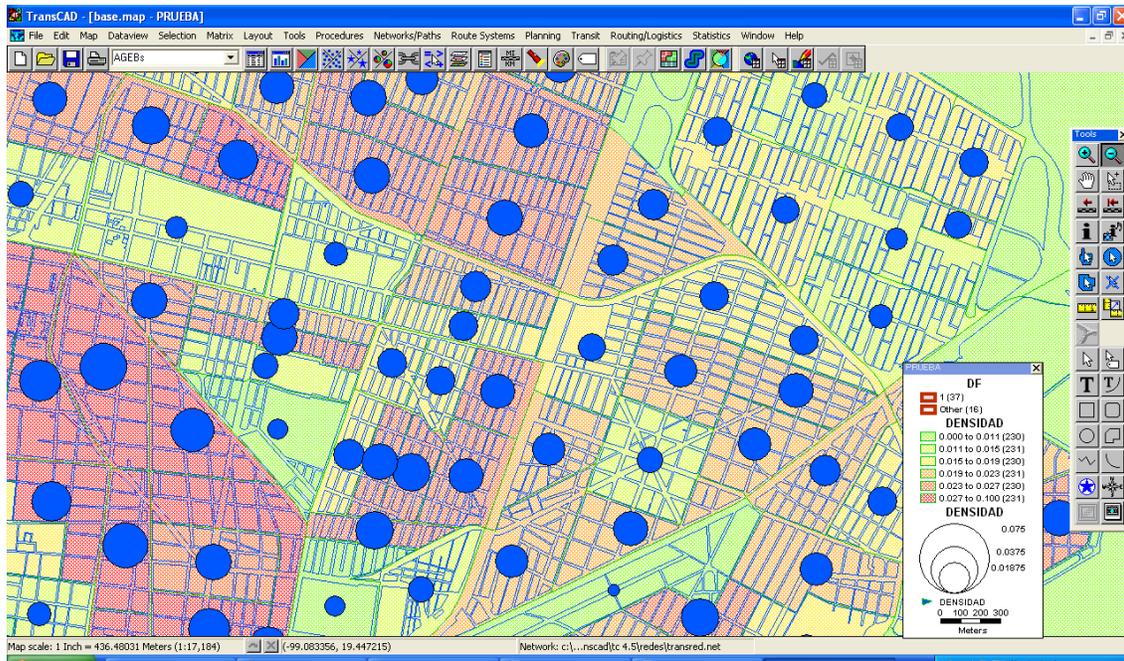


Figura 3.6 Capa de población con información del SCINCE 2005  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

**E) Red Vial.** Esta capa de información fue proporcionada por el Laboratorio de Transporte y Sistemas Territoriales del Instituto de Ingeniería (LTST-II) de la UNAM y actualizada por cuenta propia. Contiene información sobre las principales vías de circulación, nombre de las calles, número de carriles y sentidos (Ver figura 3.7). Esta red vial (red vial primaria y secundaria), incluye los arcos de las posibles rutas por donde circulan los autotancques.

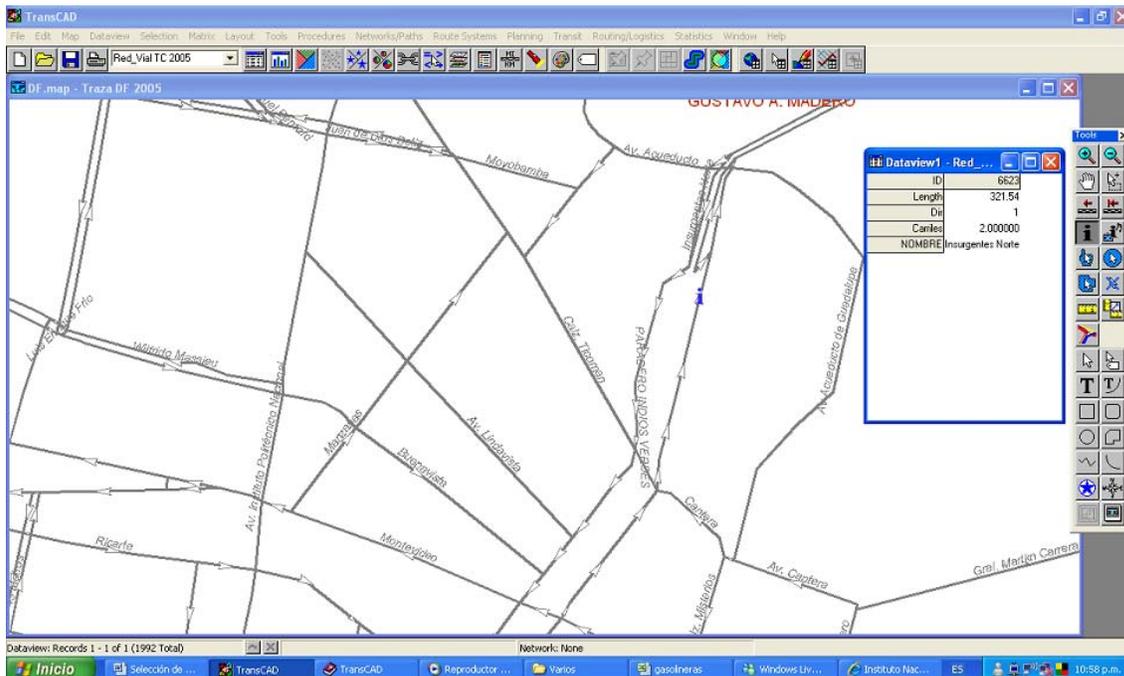


Figura 3.7 Capa de la red vial  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5 con información del LTST-II, UNAM

### 3.3.2 Oferta

La estimación de oferta de gasolinas se realizó a partir del promedio de ventas diarias de gasolinas de las cuatro TAD que dieron servicio al Distrito Federal en el mes de diciembre del 2007 ([www.pemex.gob.mx](http://www.pemex.gob.mx)). En la tabla 3.2 se puede ver que se realizaron 1,176 viajes en autotanques diariamente para distribuir las dos principales gasolinas que se venden en el Distrito Federal.

<b>Terminal de Almacenamiento y Distribución</b>	<b>Premium</b>	<b>Magna</b>	<b>Total</b>	<b>Viajes</b>
Azcapotzalco 18 de Marzo OXI	997	33,495	34,492	274
Terminal Sat. Sur Barr OXI	4,640	35,999	40,639	323
Terminal Sat. Norte San Juan Ixhuantepec OXI	7,240	26,556	33,796	269
Terminal Sat. Oriente Añil OXI	1,964	37,013	38,977	310
<b>Total de viajes en Autotanque</b>				<b>1,176</b>

Tabla 3.2 Venta diario promedio en barriles de gasolina  
Fuente: Elaboración propia con datos de Pemex ([www.pemex.gob.mx](http://www.pemex.gob.mx))

### 3.3.3 Demanda

Debido a que no se conocen con certeza las ventas totales de cada estación de servicio, ni el número de autotanques que pide cada estación de servicio, se hicieron estimaciones para determinar el número posible de viajes de autotanques hacia cada estación de servicio.

El Distrito Federal cuenta con 319 estaciones de servicio para la venta final de gasolinas ([www.profeco.gob.mx](http://www.profeco.gob.mx)). Si todas las estaciones de servicio venden la misma cantidad de gasolina, en promedio cada estación de servicio recibe:

1,176 viajes / 319 estaciones de servicio  $\approx$  4 autotanques.

Existen factores que pueden variar la cantidad de ventas en una estación de servicio como: ubicación, tamaño y distancia entre estaciones de servicio. Para la estimación de la demanda se elaboraron las siguientes tres clasificaciones de las estaciones de servicio:

- 1) De acuerdo al número de mangueras. Clase 3, estaciones de servicio con más de 34 mangueras. Clase 2, estaciones de servicio con más de 22 y a lo más 34 mangueras. Clase 1, estaciones de servicio con menos de 22 mangueras.
- 2) Por distancia entre estaciones de servicio. Clase 3, si en 1,000 metros a la redonda no existe otra estación de servicio. Clase 2, si existe una estación de servicio. Clase 1, si existen 2 o más estaciones de servicio.
- 3) Ubicación. Clase 3, si se encuentra en la red vial primaria. Clase 2, si se encuentra en la red vial secundaria.

A partir de la demanda promedio (4 autotanques) y las clasificaciones de cada estación de servicio, se asigna la demanda estimada para cada estación de servicio de acuerdo a la suma obtenida de las tres clasificaciones. Las demandas estimadas van desde 2 hasta 6 autotanques diarios ( $\pm$  50 % demanda promedio). En la tabla 3.3 se muestra un ejemplo de las tres clasificaciones de algunas estaciones de servicio (ES), y la asignación de su demanda.

ES	Clasificación x Mangueras	Clasificación x Zona	Clasificación x Vialidad	Suma	Demanda
2513	3	1	2	6	3
218	3	2	3	8	5
3130	2	1	3	6	3
8000	2	2	3	7	4
2515	2	2	3	7	4
3685	3	3	3	9	6
2490	3	2	2	8	5
5872	2	2	3	7	4
3382	2	2	2	6	3

Tabla 3.3 Estimación de demanda para estaciones de servicio de la zona de estudio  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4 DETERMINACIÓN DE RUTAS

De manera general, el objetivo principal de los modelos de transporte es reducir el costo, distancia o tiempo dependiendo del tipo de problema. Para el transporte de sustancias peligrosas, el objetivo principal es reducir la población expuesta al peligro en caso de accidente. El lado izquierdo de la figura 3.8 representa la solución para el caso más simple de los problemas de transporte, encontrar la ruta más corta entre un origen y un destino (ver páginas 23-35). El lado derecho de la figura 3.8 representa el mismo problema para el transporte de sustancias peligrosas, que consiste en encontrar la ruta más corta de un origen a un destino exponiendo a la menor cantidad de población posible. Para la distribución de gasolinas en zonas urbanas (como en el caso del Distrito Federal), el objetivo es encontrar rutas para los autotanques que en caso de un incidente expongan a la menor cantidad de población posible y que también reduzcan los costos del transporte.

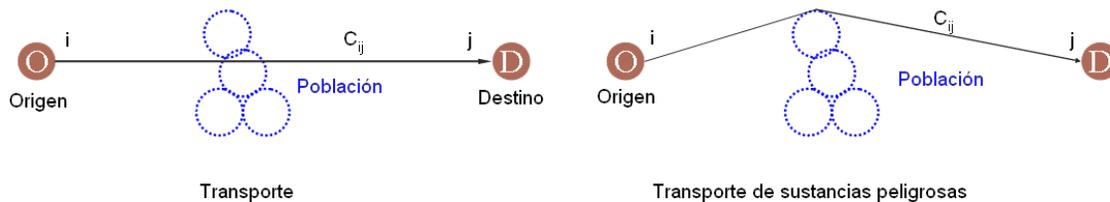


Figura 3.8 Transporte de sustancias peligrosas  
Fuente: Elaboración propia

#### 3.4.1 Modelo de Rutas de Vehículos Seleccionado

Para este estudio se utiliza el modelo de rutas de vehículos incluido en TransCAD con una de las variaciones más simples. El modelo consiste en resolver un problema de rutas de vehículos (ver páginas 29-31) con 1 origen y 80 destinos, combinado con el problema de rutas de vehículos con terminación abierta, donde los vehículos no tienen que regresar al origen después de atender a su cliente debido a que después de que un autotanque atiende a una estación de servicio el autotanque regresa vacío a la TAD y ya no representa un peligro para la población.

#### 3.4.2 Cálculo de Población Expuesta

Para el cálculo de la población expuesta, se utiliza una herramienta en TransCAD conocida como bandas (Bands), que es un área de un ancho específico que rodea una o varias características en un mapa. Esta banda es almacenada en una nueva capa que puede ser utilizada para estimar ciertos

atributos con respecto a otra capa. Para la determinación de la población expuesta sobre un segmento de vialidad, se utilizaron dos bandas con diferentes anchos, una banda de 50 metros (zona de aislamiento inmediata) y otra de 800 metros (zona de evacuación). Estas bandas se superponen a la capa de la población para determinar la población que se encuentra dentro de las bandas. En la figura 3.9 se muestra un ejemplo de dos bandas una de 50 y la otra de 800 metros alrededor de una ruta. Estas bandas se comparan con respecto a la capa de la población para saber cuál es la población que se encuentra dentro de cada banda. En la banda de 800 metros la población expuesta es de 155 mil personas y en la banda de 50 metros la población expuesta es de 9 mil personas.

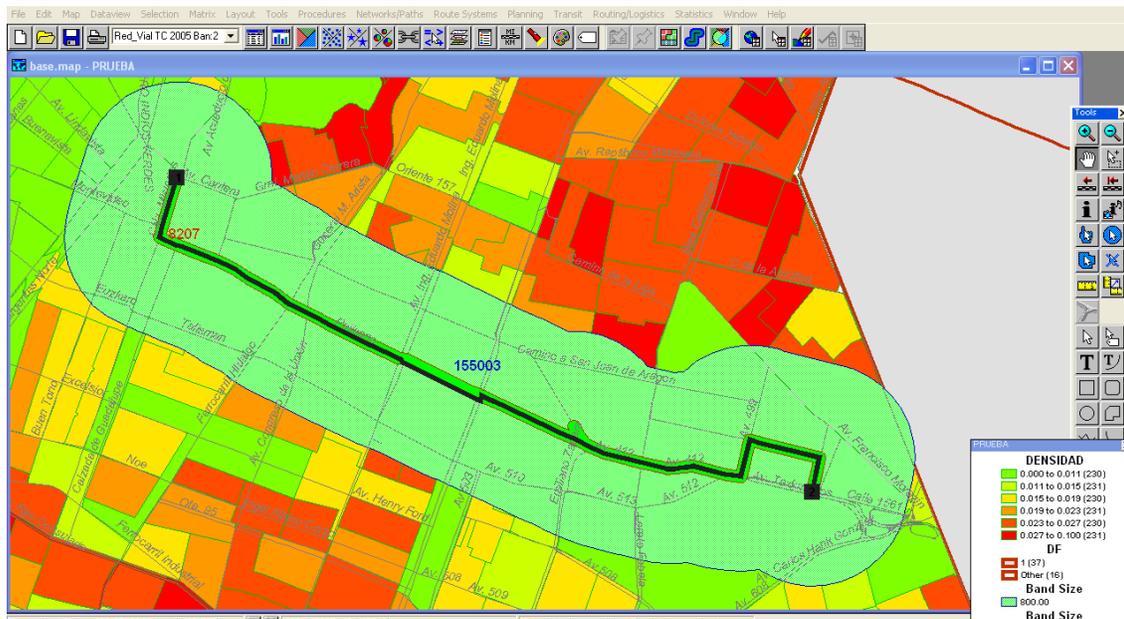


Figura 3.9 Aplicación del comando de bandas  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 3.4.3 Aplicación en TransCAD

Pasos para resolver el problema de rutas de vehículos en TransCAD:

1.- Se preparan las capas de orígenes y destinos en archivos geográficos con la localización de cada punto. Cada capa debe de contener ciertos campos necesarios (Ver figura 3.10)

Los campos mínimos para la capa de orígenes son:

- 1) Campo identificador (ID) tipo entero
- 2) Nombre de la TAD (NAME) tipo carácter
- 3) Hora de apertura (Open Time) tipo entero en formato militar
- 4) Hora de cierre (Close Time) tipo entero en formato militar
- 5) Identificador de nodo (Node ID) tipo entero, que es el ID (número identificador) del nodo más cercano de la red vial

En TransCAD el problema de rutas de vehículos incluye la variante de ventanas de tiempo. Las horas de apertura y de cierre se ingresan en formato militar (por ejemplo 7 a.m. = 700 hrs.). En este estudio no se consideran las ventanas de tiempo. Por esta razón se dejó una ventana de tiempo suficientemente amplia evitando así que el tiempo se convirtiera en una restricción (hora de apertura = 0 hrs. y hora de cierre = 2400 hrs.).

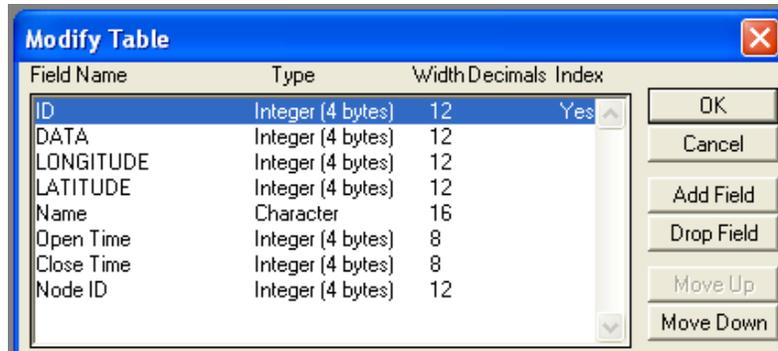


Figura 3.10 Campos de la capa de orígenes  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

Los campos mínimos para la capa de destinos (Ver figura 3.11) son:

- 1) Campo identificador (ID) tipo entero
- 2) Nombre de la estación de servicio (NAME) tipo carácter
- 3) Hora de apertura (Open Time) tipo entero en formato militar
- 4) Hora de cierre (Close Time) tipo entero en formato militar
- 5) Demanda (Pickup Demand) tipo entero
- 6) Identificador de nodo (Node ID) tipo entero que es ID del nodo más cercano de la red

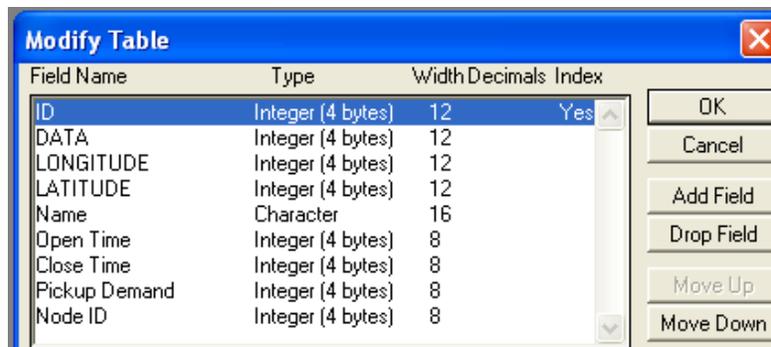


Figura 3.11 Campos de la capa de destinos  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

2.-Se crea la matriz de rutas de vehículos que es una matriz que contiene la distancia a través de la ruta más corta entre cada par de nodos (Ver figura 3.12).

	<b>2870</b>	<b>11324</b>	<b>11748</b>
<b>2870</b>	<b>0.00</b>	<b>294.44</b>	<b>6188.63</b>
<b>11324</b>	<b>294.44</b>	<b>0.00</b>	<b>6239.27</b>
<b>11748</b>	<b>6176.59</b>	<b>6227.23</b>	<b>0.00</b>

Figura 3.12 Matriz de rutas de vehículos con tres nodos.  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

3.- Se crea una tabla de vehículos que contiene información sobre la capacidad de los vehículos el tipo de vehículos y el número de vehículos disponibles (Ver figura 3.13)

Dataview6 - VEH_TAB				
DepotID	Type	Capacity	Num_Vehs	Cost
4	1	20.00	10	100.00

Figura 3.13 Tabla de vehículos  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

4.-Se ejecuta el procedimiento de rutas de vehículos, y TransCAD muestra las rutas encontradas, las cuales son subóptimas respecto a sólo un criterio, en este caso la distancia.

### 3.4.4 Adaptación del modelo VRP al transporte de sustancias peligrosas

Para este estudio se asume que la ruta utilizada por los conductores de los autotankers corresponde a la distancia más corta entre la TAD y las ES. Así mismo se asume que la distribución de gasolinas en la zona de estudio es realizada desde la TAD San Juan Ixhuantepec.

Los pasos seguidos para el análisis de distribución de gasolinas son los siguientes:

Paso 1. Se determina el conjunto de rutas más cortas entre la TAD y las ES (situación actual), utilizando la distancia, en el problema de rutas de vehículos (Ver figura 3.14).

Paso 2. Se calcula población expuesta a lo largo de las rutas actuales.

Paso 3. Se determina el conjunto de rutas que minimiza la población expuesta a lo largo de éstas (Propuesta 1) (Ver figura 3.14).

Paso 4. Se calcula la población expuesta a lo largo de las rutas de la propuesta 1

Paso 5. Se determina el conjunto de rutas que minimizan una ponderación entre la población expuesta y la distancia recorrida (propuesta 2) (Ver figura 3.14).

Paso 6. Se calcula la población expuesta a lo largo de las rutas de la propuesta 2

Paso 7. Se comparan las rutas actuales con las rutas de las propuestas 1 y 2.



Figura 3.14 Representación de las rutas actuales y las rutas de la propuesta 1 y 2  
 Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

La matriz de las rutas actuales fue obtenida con base en las distancias de los arcos, y el VRP (ver páginas 29-31) fue resuelto minimizando el campo de la distancia. Para obtener la matriz de la propuesta 1, fue creado un campo nuevo en la base de datos de la red vial, con la población expuesta es decir aquella obtenida en una banda de 100 metros alrededor de cada arco; este campo llamado Población fue utilizado para crear una nueva matriz, y el VRP fue resuelto minimizando la Población (en lugar de la distancia). Para la propuesta 2 fue creado otro campo en la base de datos de la red vial, con la ponderación de la distancia y la población expuesta; este campo llamado 50-50 fue utilizado para obtener la matriz de vehículos, y el VRP fue resuelto minimizando este campo (Ver figura 3.15).

ID	Length	Dir	Carriles	NOMBRE	[Time /100]	Poblacion	[50-50]
72	385.27	1	5.000000	Azúcar	3.85	503.22	506.08
20422	237.27	1	2.000000	Hangares	2.37	606.41	435.78
4950	418.04	1	5.000000	Av. Congreso de la Unión	4.18	829.99	667.98
6445	143.66	1	5.000000	Azúcar	1.44	283.84	228.97
7222	372.41	1	4.000000	Av. 506	3.72	659.77	561.74
7225	379.68	0	3.000000	Av. 510	3.80	613.84	548.09

Figura 3.15 Atributos utilizados para la creación de la matriz de vehículos  
 Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

---

## **CAPÍTULO 4**

### **POBLACIÓN EXPUESTA EN CASO DE UN INCIDENTE**

#### **4.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se hace una simulación de un accidente involucrando a un autotanque cargado de gasolina para hacer una estimación de la población que tendría que ser evacuada utilizando las distancias de evacuación establecidas en la Guía de Respuesta en caso de Emergencia (US DOT, 2004). En la primera parte se analiza la población expuesta en los destinos (estaciones de servicio). Por último se simula el accidente en 25 puntos al azar en algunas de las principales avenidas de la red vial. Las distancias a evacuar en caso de un accidente dependen del tipo de accidente. En caso de un derrame se debe aislar 50 metros a la redonda y 300 metros a favor del viento. En caso de incendio que involucre un autotanque de gasolina se debe evacuar a 800 metros a la redonda (US DOT, 2004).

#### **4.2 SIMULACIÓN DE UN ACCIDENTE EN LOS DESTINOS**

Para esta simulación se considera que el accidente ocurre en las estaciones de servicio. Se tiene dos posibles casos: en caso de derrame, ó en caso de incendio.

##### **4.2.1 En caso de Derrame**

De acuerdo con la guía de respuesta en caso de emergencia, en caso de un derrame de gasolina se debe aislar 50 metros a la redonda y evacuar 300 metros a favor del viento. En la figura 4.1 se muestra un mapa de la zona de estudio con un bandas de 50 y 300 metros alrededor de las estaciones de servicio (Ver figura 1.20). Dado que la población expuesta está en función de la dirección del viento, no toda la población dentro de esta banda estaría expuesta. Para este análisis se considera sólo una cuarta parte de la banda de 300 metros y tres cuartas partes de la banda de 50 metros (ya que una cuarta parte de esta banda ya estaría considerada en la banda de 300 metros).

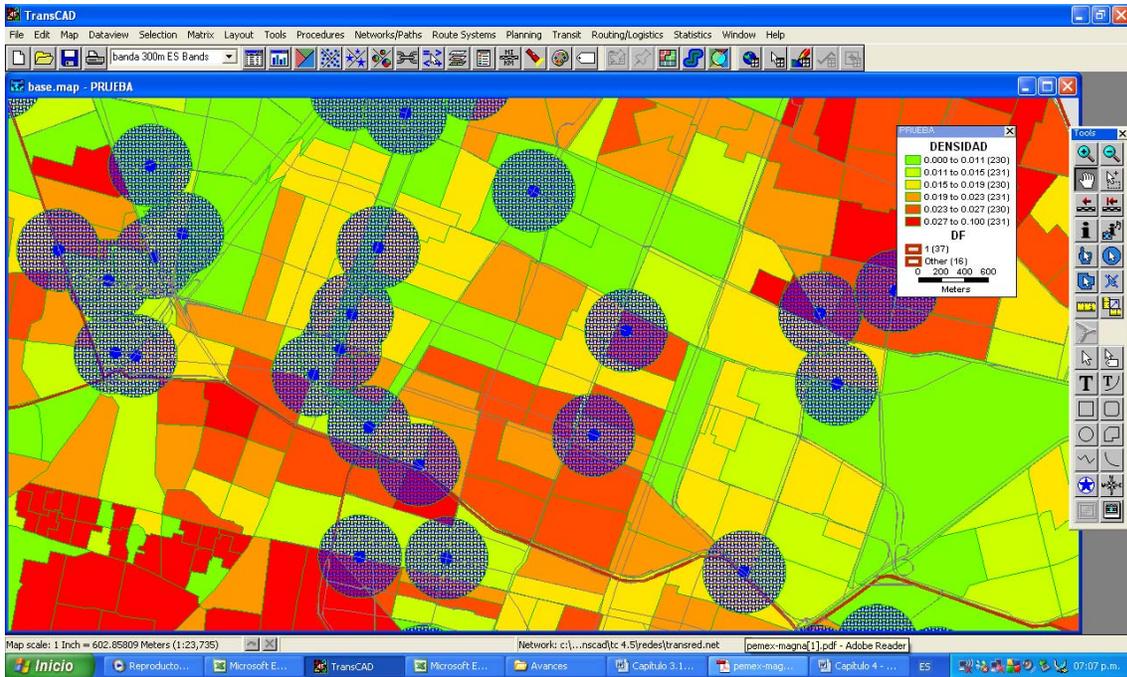


Figura 4.2 Población a evacuar en caso de derrame de gasolina  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En caso de un derrame de gasolina en una estación de servicio en promedio se tendría que evacuar a 1,100 personas, dependiendo de la estación de servicio en la que ocurriera. En la figura 4.2 se hace una clasificación de las de las personas que tendrían que ser evacuadas por estación de servicio. De color rojo se muestran las estaciones de servicio que tendrían que evacuar de 1440 – 2500 personas.

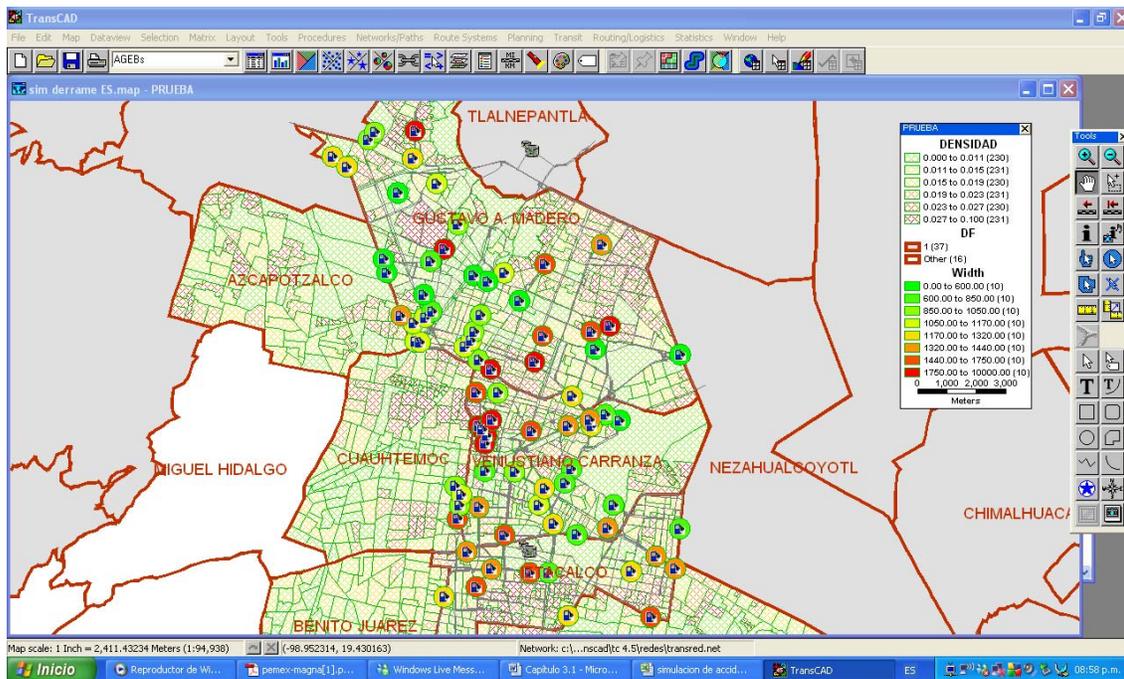


Figura 4.2 Población expuesta en caso de derrame de gasolina  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 4.2.2 En caso de Incendio

En la figura 4.3 se crea una banda con un radio de 800 metros alrededor de las estaciones de servicio (distancia a evacuar en caso de que el incendio involucre un autotanque de gasolina).

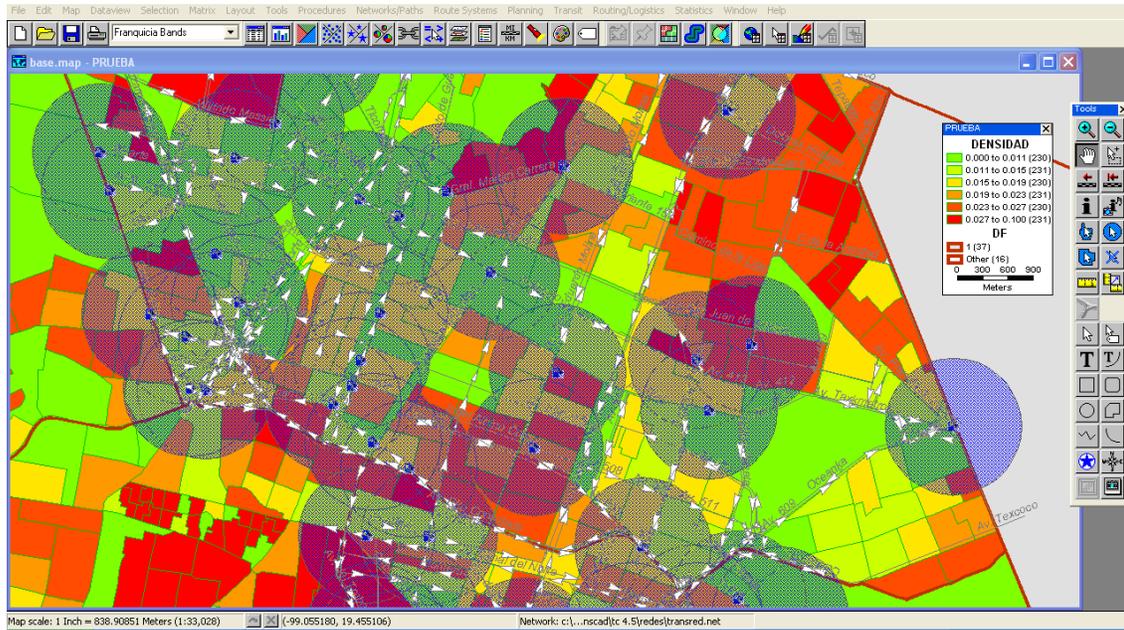


Figura 4.3 Población a evacuar en caso de un incendio que involucre un autotanque  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En la figura 4.3 se puede ver que en caso de un incendio que involucre un autotanque en alguna estación de servicio, alguna otra estación de servicio podría ser evacuada debido a la proximidad entre ellas.

En la figura 4.4 se muestra una banda de 800 metros alrededor de cada estación de servicio.

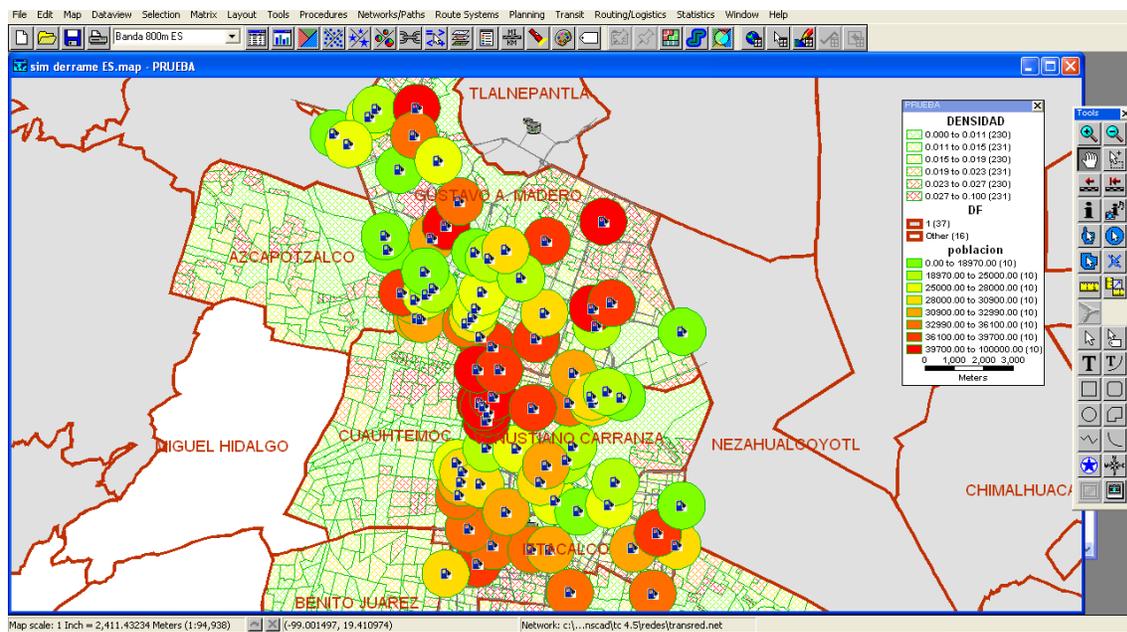


Figura 4.4 Población expuesta en caso de un incendio que involucre un autotanque  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En caso de un incendio la población a evacuar sería de 30,500 personas en promedio, en la figura anterior se muestran de color rojo las estaciones de servicio que en caso de un incendio tendrían que evacuar de 36,000 a 56,000 personas.

### 4.3 SIMULACIÓN DE UN ACCIDENTE EN ALGUNA VIALIDAD

Para esta simulación se considera que el accidente ocurre durante el transporte de gasolinas en alguna vialidad. De manera aleatoria se seleccionaron 25 puntos sobre la red vial. Se tiene dos posibles casos: derrame e incendio.

#### 4.3.1 En caso de Derrame

En la figura 4.5 se muestra los 25 puntos en los que se simula un accidente en caso de derrame. De color rojo se muestran algunas zonas en las que la población expuesta es mayor a 1,200 personas.

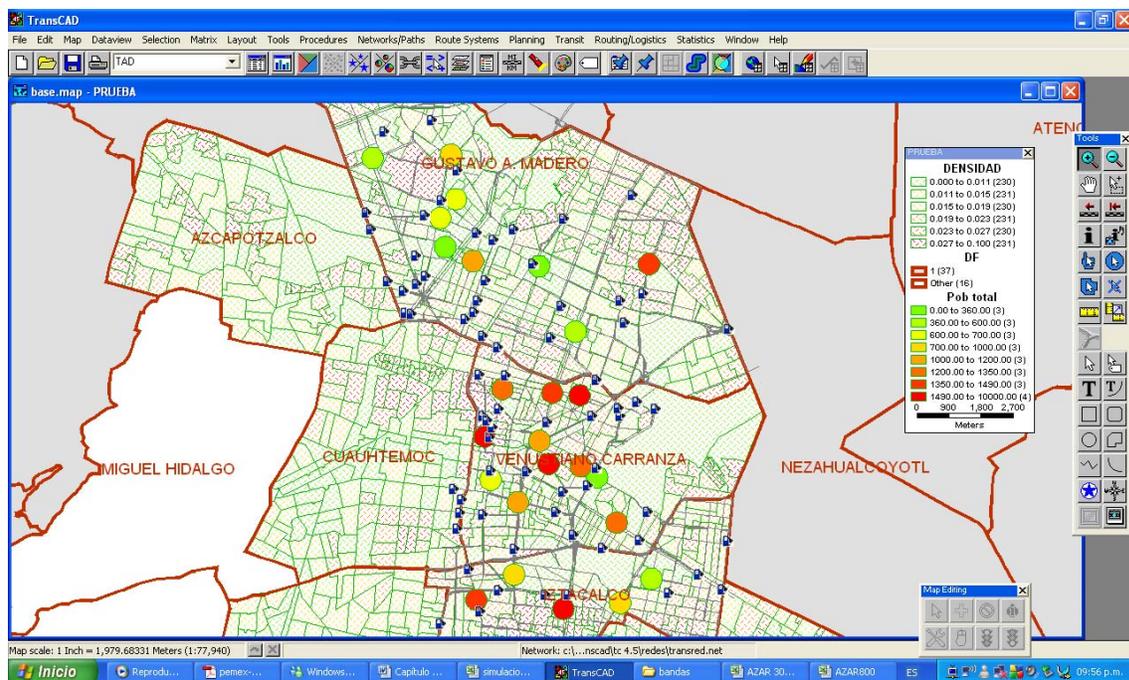


Figura 4.5 Población expuesta en caso de derrame de gasolina en una vialidad  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

La población expuesta en caso de un derrame en estos puntos sería en promedio de 1,000 personas.

#### 4.3.1 En caso de Incendio

En la figura 4.6 se utilizan los mismos puntos que en el caso de un derrame, pero se usa una banda con diámetro de 800 metros.

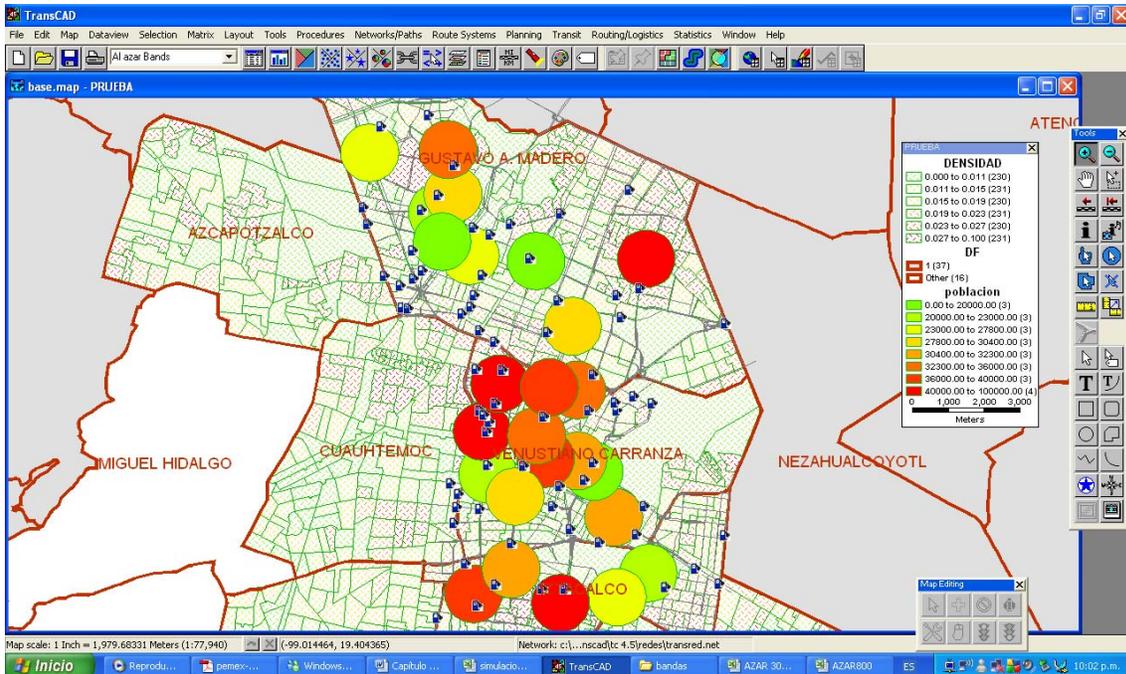


Figura 4.5 Población expuesta en caso de incendio que involucra un autotank en una vialidad  
 Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En estos puntos, la población expuesta que debe ser evacuada es en promedio 30,000 personas. De color rojo se muestran los puntos que en caso de incendio que involucre un autotank en una vialidad se evacuarían de 32,000 a 45,000 personas.

Debido a la gran cantidad de personas que reside sobre algunas vialidades (6 segmentos de vialidades) es importante encontrar rutas de distribución alternas que circulen donde no hay tanta población expuesta.

---

## **CAPÍTULO 5**

### **ANÁLISIS DE LAS RUTAS DE DISTRIBUCIÓN**

#### **5.1 INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se hace el análisis de las rutas de distribución de gasolinas en la zona de estudio; se simulan las rutas actuales y las rutas propuestas para la distribución de gasolinas en la zona noroeste del Distrito Federal (los resultados se concentran en el anexo A). En la primera parte se analizan: los sistemas de rutas, las principales avenidas utilizadas y la población expuesta para cada escenario. Por último, se hace una comparación general entre las rutas actuales de distribución con las rutas de las propuestas 1 y 2.

#### **5.2 RUTAS ACTUALES DE DISTRIBUCIÓN**

El escenario que representa la situación actual asume que los vehículos utilizan las rutas de mínima distancia. Por lo tanto, se utiliza un modelo de rutas de vehículos para determinar aquellas rutas de distribución que minimizan la distancia recorrida de los autotranques desde la TAD hacia todas las estaciones de servicio.

En la figura 5.1 se presentan las rutas actuales en la distribución de gasolinas. Cada línea de color representa la ruta más corta entre la TAD y cada estación de servicio. Las rutas son colocadas a los costados de la red vial, por lo que los segmentos de líneas de colores más amplios representan a un mayor número de autotranques que circulan por la misma vialidad.

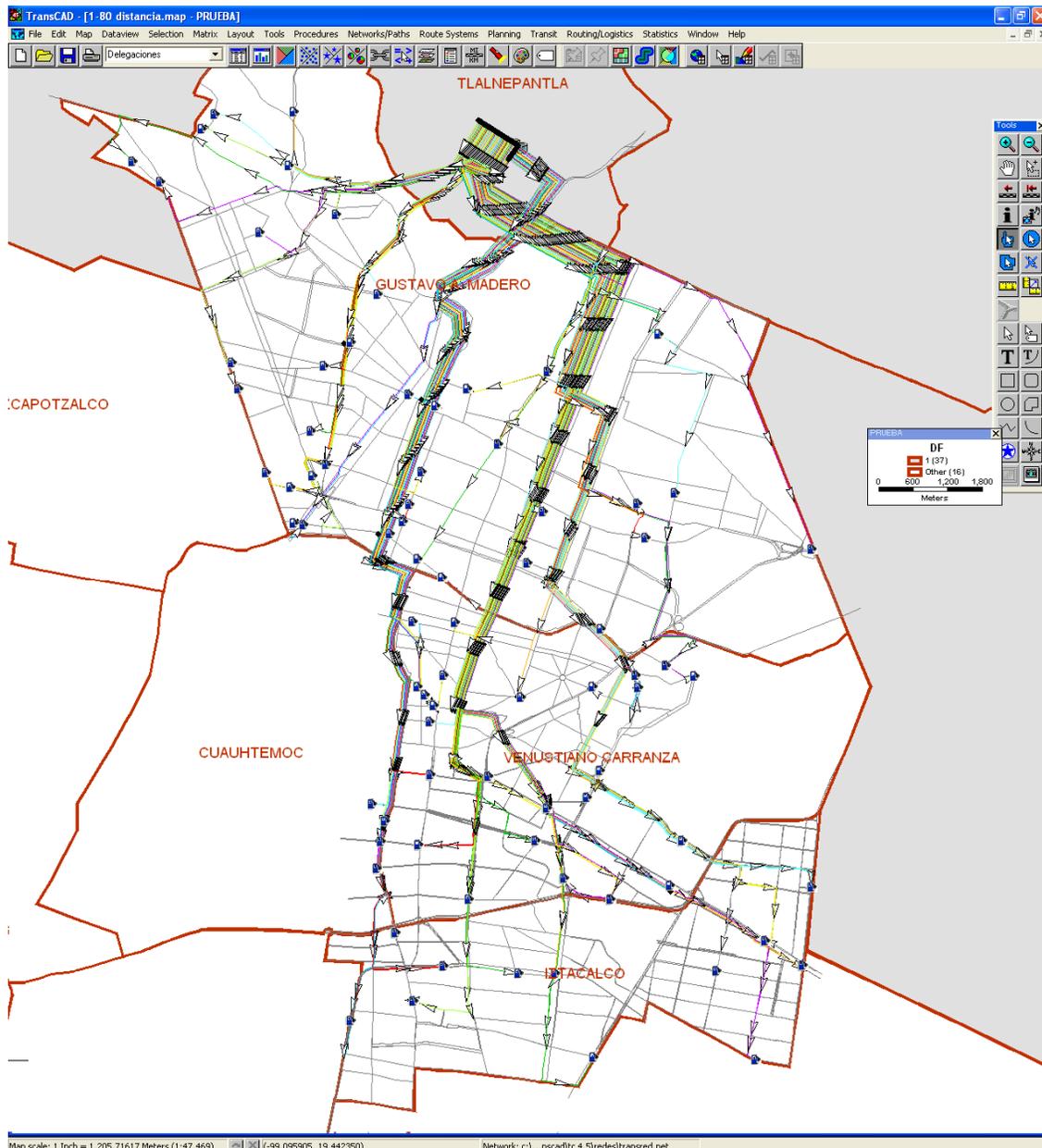


Figura 5.1 Simulación de rutas actuales de distribución de gasolinas  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 5.2.1 Principales Avenidas Utilizadas

En la figura 5.1 y 5.2 se puede ver que la distribución actual en la zona piloto, se realiza en su mayor parte por avenidas principales. En la figura 5.2 se hace una clasificación de las principales vialidades utilizadas. De color rojo se muestran las avenidas por las que normalmente transitan los autotankers actualmente (de un 20 al 100 % de las rutas). Estas vialidades son:

- 1) Anillo periférico (100 %)
- 2) Ingeniero Eduardo Molina (42 %)
- 3) Insurgentes Norte (26 %)
- 4) Acueducto de Guadalupe (22 %)

En esta misma figura, de color naranja, se muestran las avenidas por las que circulan del 10 al 15% de las rutas. Estas vialidades son:

- 1) Av. Gran Canal (19 %)
- 2) Av. del Trabajo (17 %)
- 3) Av. 503 (12 %)
- 4) Vidrio Plano (10 %)

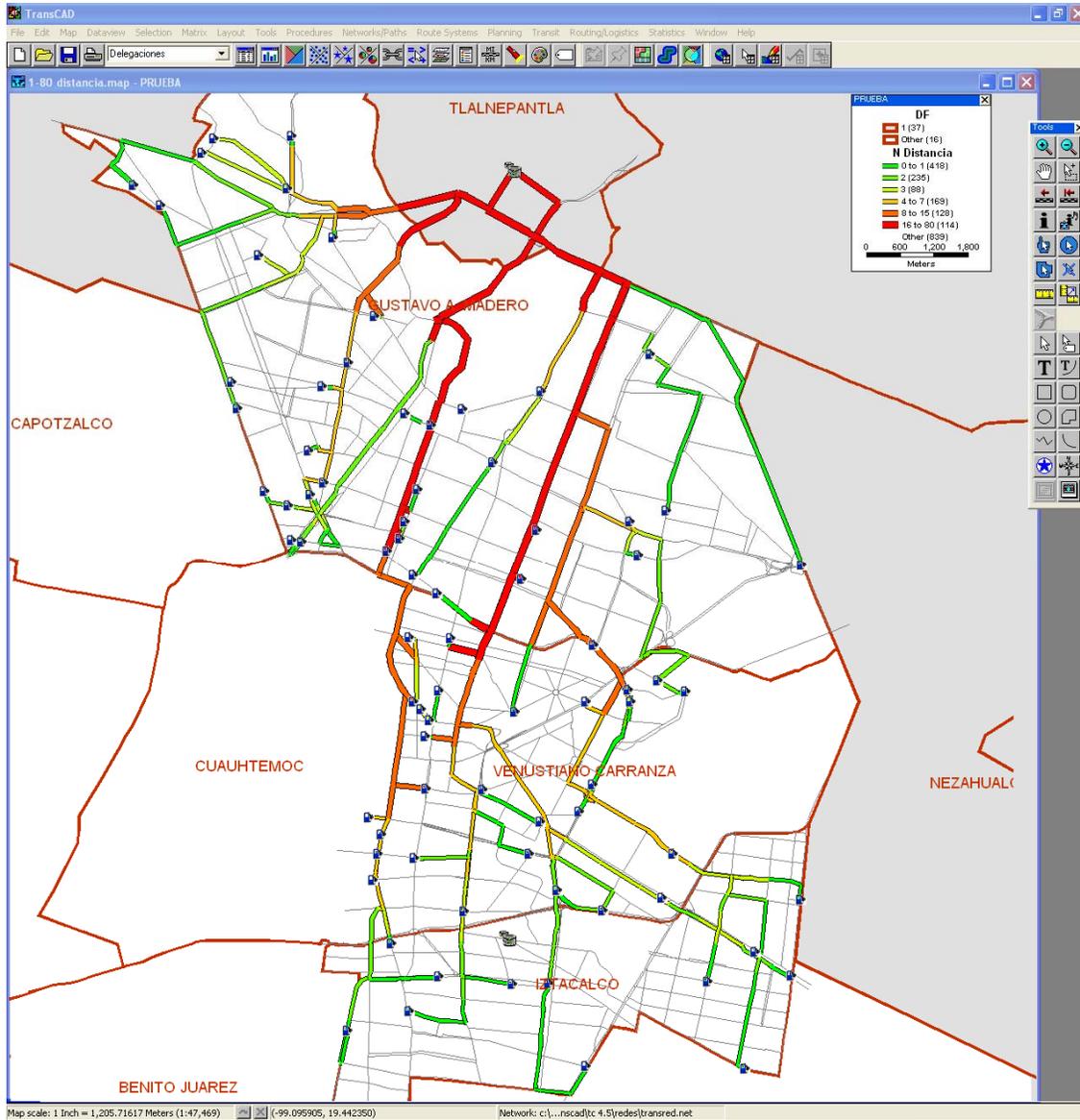


Figura 5.2 Clasificación de las principales vialidades utilizadas en las rutas actuales de distribución de gasolinas  
 Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 5.2.2 Población Expuesta en las Rutas Actuales

En la figura 5.3 se muestra un mapa que contiene las rutas actuales de distribución y la densidad de población. Con la capa de datos de la población residente por AGEB y el área de éstas, se obtuvo la densidad de población ( $\text{hab}/\text{km}^2$ ), la cual es representada con seis clases de diferentes colores que van de verde en las zonas con menor densidad hasta rojo en aquellas zonas con mayor densidad.

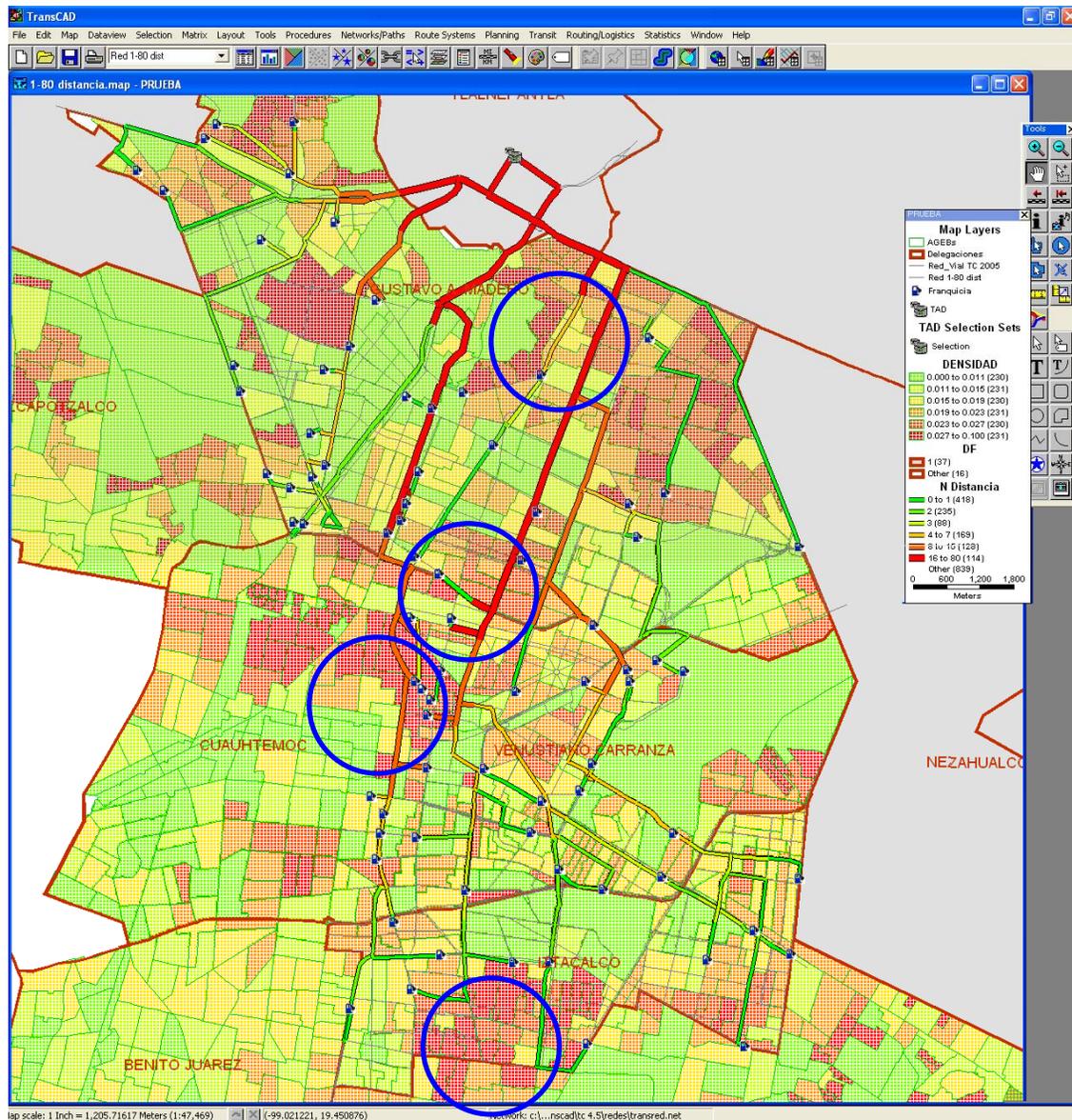


Figura 5.3 Población expuesta en las rutas actuales de distribución de gasolinas  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En la tabla 5.1 se muestran las 10 rutas actuales de distribución que exponen a un mayor número de personas a 50 metros (Ver anexo A para el resto de las rutas). En esta tabla se puede ver que las rutas que exponen a un mayor número de personas son aquéllas con distancias más largas. También se puede apreciar que la mayoría de estas estaciones de servicio son de alta demanda.

RUTA	ACTUAL					
	TAD	E S	Demanda	Km	P.E. 50m	P.E. 800m
San Juan	5035	6		125.46	187,393	3,027,154
San Juan	3685	6		121.92	175,321	2,860,977
San Juan	114	5		98.10	141,200	2,294,592
San Juan	4959	6		112.50	137,974	2,364,890
San Juan	218	5		92.25	134,712	2,252,677
San Juan	205	5		87.70	126,014	1,901,867
San Juan	2509	6		92.52	124,775	2,134,236
San Juan	2506	5		85.45	122,768	1,960,870
San Juan	4869	5		96.55	120,729	2,091,463
San Juan	2878	5		95.60	115,246	2,076,714

Tabla 5.1 Ejemplo de las rutas actuales de distribución

Fuente: Elaboración propia

La columna de distancia recorrida (Km) es la distancia total que se tiene que recorrer diariamente para atender la demanda de cada estación de servicio. La columna P.E. 50m es la población expuesta en un radio de 50 metros y la columna P.E. 800 m es la población expuesta en un radio de 800 metros a lo largo de cada ruta.

Las mismas personas son expuestas en múltiples ocasiones debido a que las rutas pasan varias veces por las mismas avenidas.

Para este escenario de distribución, la distancia total que se recorre diariamente por los autotaxis es de 3,750 Km. y durante estos recorridos se expone en un radio de 800 metros a 1'998,682 personas. En promedio, estas personas son expuestas 39 veces al día (77'102,547 personas en total).

En un radio de 50 metros se expone a 224,560 personas, en promedio 20 veces al día (4'489,662 personas en total).

### 5.2.3 Principales Problemas Encontrados

El principal problema de este escenario es la gran cantidad de población expuesta, sobre todo en algunas rutas que atraviesan por zonas altamente pobladas. Para estas rutas, la distancia más corta aunque podría ser la más económica no es la mejor alternativa para la población expuesta.

Existen algunos segmentos críticos en las rutas actuales de distribución. En la figura 5.3 se identifican principalmente 4 segmentos (Círculos azules) en los que a simple vista se puede apreciar que las rutas atraviesan zonas con alta densidad de población.

## 5.3 PROPUESTA 1, RUTAS CON POBLACIÓN EXPUESTA MÍNIMA

La propuesta 1 consiste en determinar el conjunto de rutas que minimizan tanto como sea posible la población expuesta. Para este escenario se utiliza un modelo de rutas de vehículos utilizando como objetivo la minimización de la población expuesta.

Este paso se realiza con ayuda de la herramienta de bandas para determinar cuál es la población expuesta en cada arco de la red vial. Este dato es almacenado en un campo nuevo de la base de datos de la red vial y utilizado para crear una nueva matriz. En la figura 5.4 se muestra el conjunto de rutas de distribución que minimizan la población expuesta.

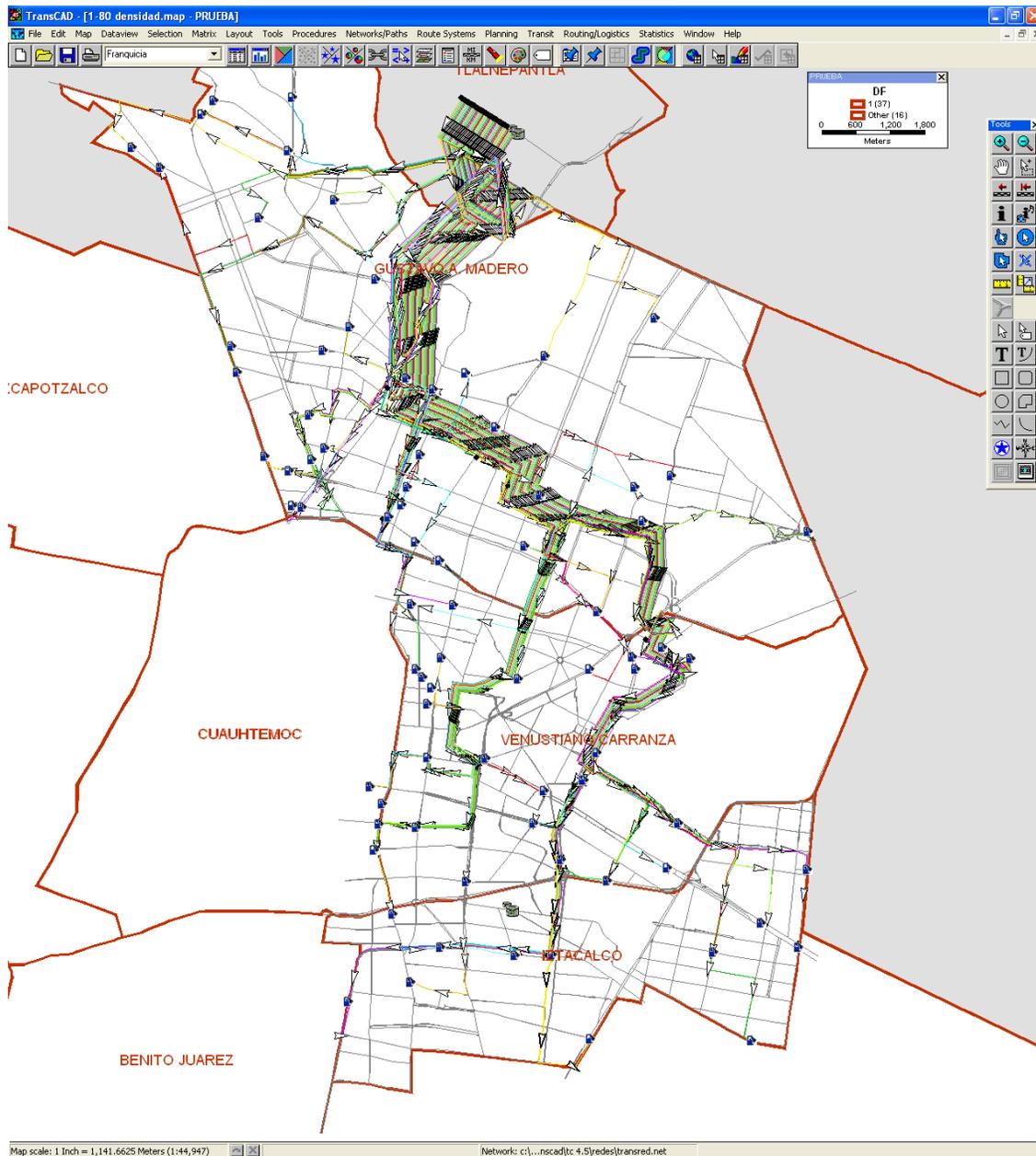


Figura 5.4 Simulación de rutas de distribución de gasolinas con población expuesta mínima  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 5.3.1 Principales Avenidas Utilizadas

En la figura 5.5 se hace una clasificación de las principales avenidas utilizadas con esta propuesta. De color rojo se muestran las vialidades que son utilizadas principalmente. Estas avenidas son:

- 1) Anillo Periférico (100 %)
- 2) Insurgentes Norte (83 %)
- 3) Acueducto de Guadalupe (72 %)
- 4) Pelicano (56 %)
- 5) Av. 510 (52 %)
- 6) Av. Gran Canal (51 %)
- 7) Loreto Fabela (26 %)
- 8) Río Consulado (22 %)

En la misma figura de color naranja se muestran las avenidas que son utilizadas del 7 al 16 % de las rutas. Estas vialidades son:

- 1) Av. Peñón (15 %)
- 3) Vidrio Plano (14 %)
- 3) Calzada de los misterios (12 %)
- 4) Hangares (11 %)
- 5) Río Churubusco (11 %)

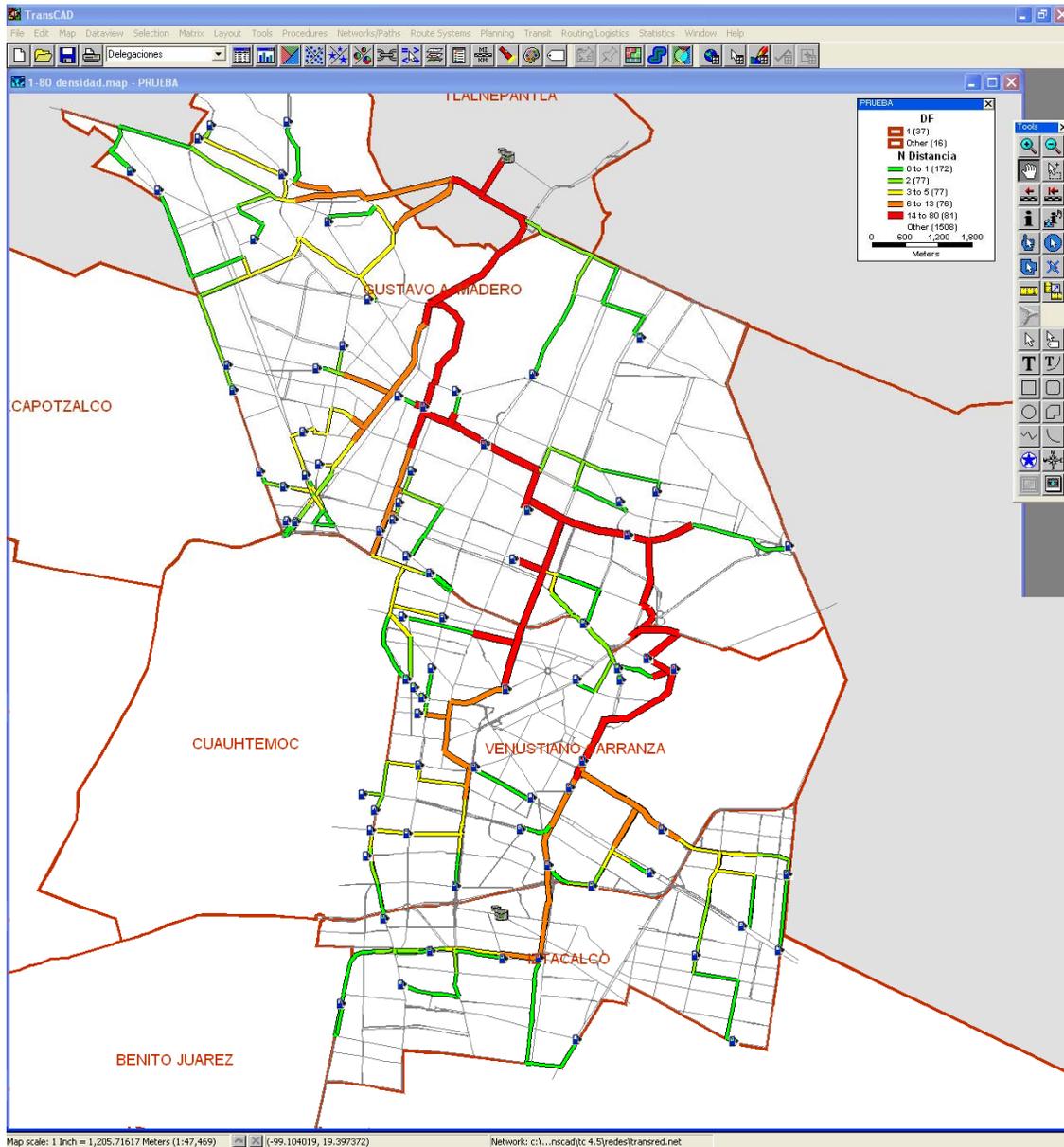


Figura 5.5 Clasificación de las principales vialidades utilizadas en las rutas con población expuesta mínima  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 5.3.2 Población Expuesta en la Propuesta 1

En la figura 5.6 se puede ver que las rutas evitan cruzar las zonas con mayores densidades (zonas rojas) y sólo en los casos que el destino se encuentra dentro de dichas zonas, las rutas cruzan por estos segmentos.

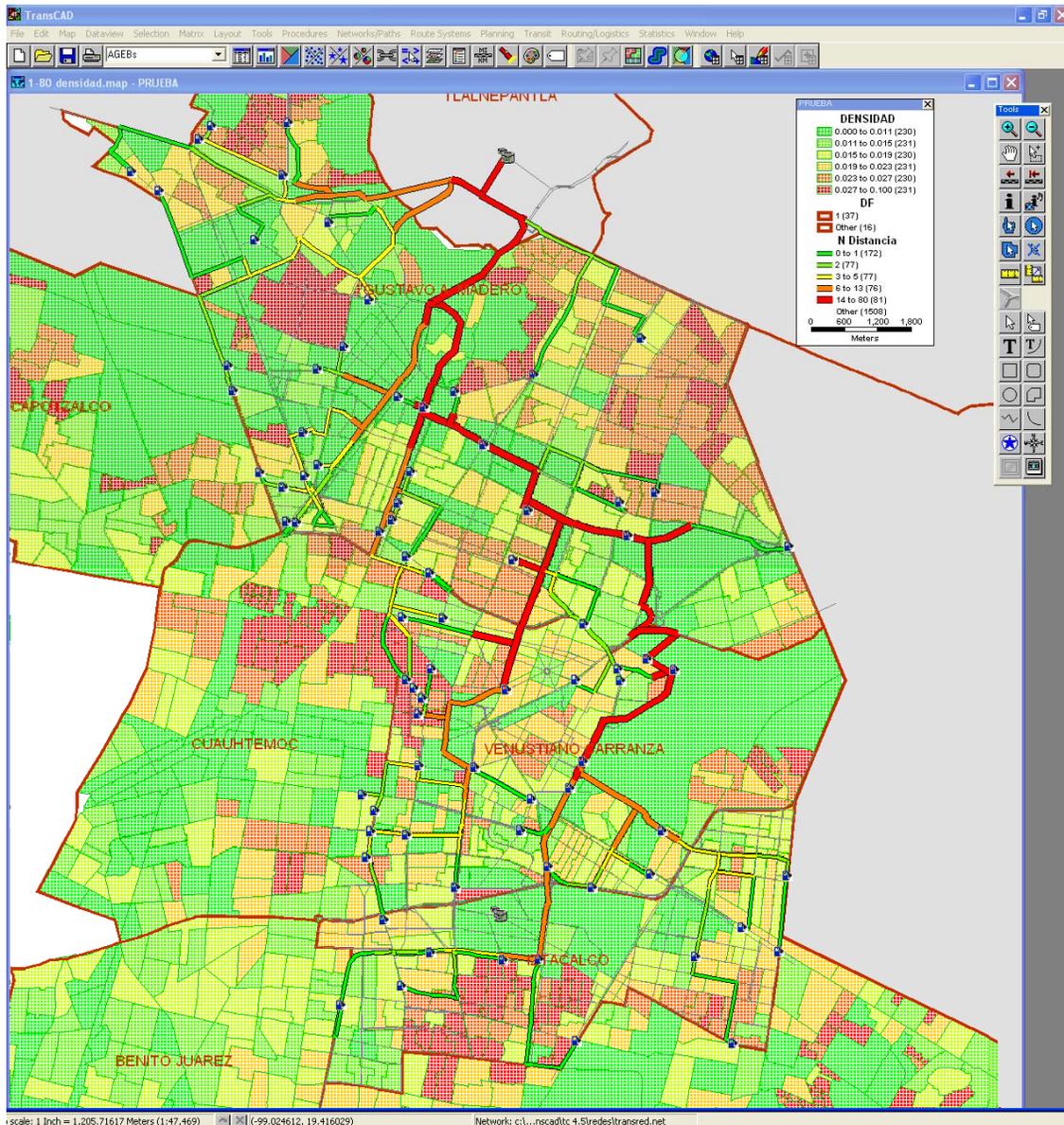


Figura 5.6 Población expuesta en las rutas con población expuesta mínima

Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En la tabla 5.2 se muestra un ejemplo de las 10 rutas de la propuesta 1, que exponen a un mayor número de personas (Ver anexo A para el resto de las rutas). En esta tabla se puede ver que 9 de las 10 rutas actuales se repiten, sin embargo la población expuesta a 50 y 800 metros es mucho menor.

RUTA			PROPUESTA 1		
TAD	E S	Demanda	Km	P.E. 50m	P.E. 800m
San Juan	5035	6	156.06	132,600	2,431,055
San Juan	3685	6	150.84	123,325	2,384,912
San Juan	4959	6	139.98	102,744	1,926,045
San Juan	218	5	127.75	101,179	2,074,649
San Juan	2509	6	107.40	97,425	2,032,307
San Juan	114	5	123.10	94,603	1,752,728
San Juan	4869	5	119.45	91,371	1,725,758
San Juan	2878	5	118.50	85,892	1,711,010
San Juan	97	6	103.44	82,820	1,858,133
San Juan	205	5	113.10	81,421	1,496,587

Tabla 5.2 Ejemplo de las rutas de la propuesta 1  
Fuente: Elaboración propia

### 5.3.3 Análisis del Sistema de Rutas de la Propuesta 1

En la simulación de las rutas de la propuesta 1 (rutas con población expuesta mínima) se encontraron 3 casos diferentes (Ver figura 5.7):

#### **Caso 1. Reducción de la población mediante rutas alternas**

Fue posible cambiar el 80 % de las rutas por otras rutas, para reducir la población expuesta. Aunque estas nuevas rutas significaron un incremento en la distancia recorrida (en promedio un 17 %), se logra reducir la población expuesta (en promedio un 29 %) a través de rutas alternas.

En la figura 5.7 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 26. La ruta actual (línea de color negro) utiliza la avenida Instituto Politécnico Nacional, la distancia recorrida es de 30 Km. y la población expuesta en un radio de 50 metros es de 30 mil personas. Con la propuesta 1 la ruta se desvía por la avenida Insurgentes Norte (línea de color azul), la distancia recorrida se incrementa de 30 a 36 Km. (20 % más) pero la población expuesta se reduce de 30 mil a 13 mil personas (59 % menos).

#### **Caso 2. Utilización de las rutas actuales**

Para el 15 % de las rutas no se reduce la población expuesta, dado que algunas de las rutas que minimizan la distancia recorrida también minimizan la población expuesta.

En la figura 5.7 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 56, donde la ruta actual (línea de color negro) no cambia con la ruta de la propuesta 1 (línea de color azul). Ambas rutas utilizan al Anillo Periférico para después dar vuelta en la avenida General M. Arista. Estos casos de manera general se dan cuando la estación de servicio (punto de demanda) se encuentra localizado dentro de una zona con alta densidad.

#### **Caso 3. Reducción de la población mediante rutas alternas sin incrementar la distancia recorrida.**

En el 5% de las rutas es posible reducir la población mediante rutas alternas sin incrementar la distancia recorrida. Aunque la reducción de la población expuesta sólo fue en promedio un 2%, no se incurre en ningún incremento en la distancia recorrida.

En la figura 5.7 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 76. La ruta actual (línea de color negro) utiliza la avenida Acueducto para después dar vuelta en avenida Cuauhtepac, esta ruta recorre una distancia de 22 Km. y expone a una población en un radio de 50 metros de 17 mil personas. Con la propuesta, la nueva ruta utiliza la avenida Acueducto

pero da vuelta en la avenida Puerto de Mazatlán; con esta desviación la distancia recorrida es prácticamente la misma (40 metros más), y la población expuesta se reduce en mil personas (4 %).

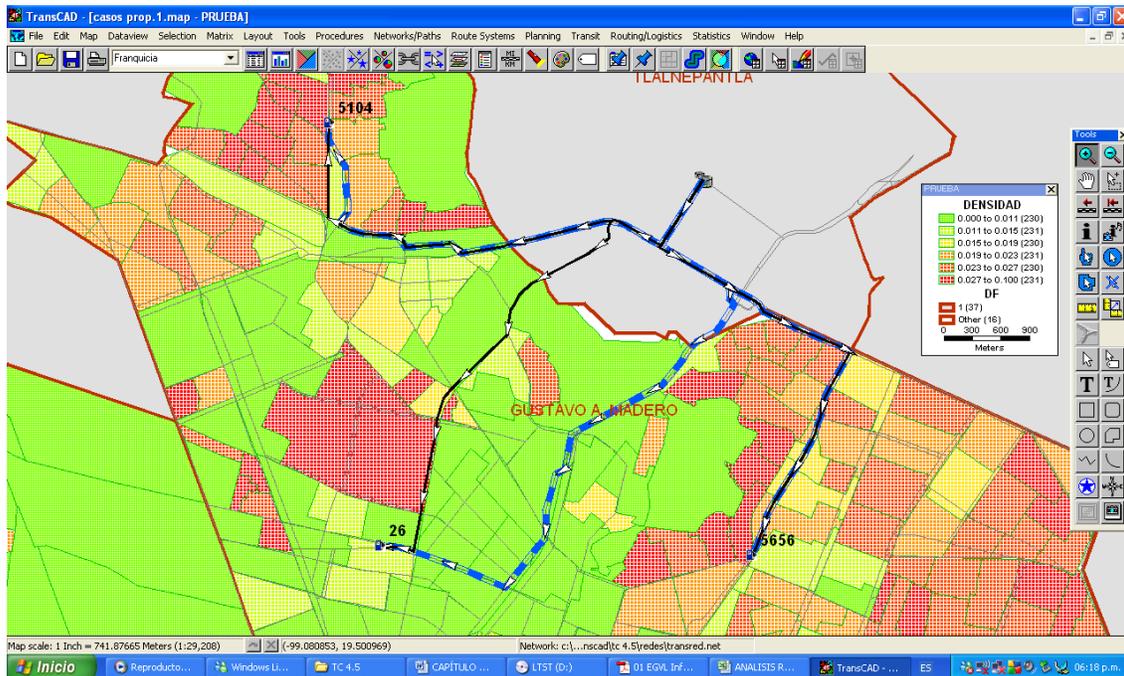


Figura 5.7 Casos encontrados en la propuesta 1  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

Para este escenario de distribución (que minimiza la población total expuesta), la distancia total que se recorre diariamente por los autotranques es de 4,510 Km. y durante estos recorridos se expone en un radio de 800 metros a 1'880,162 personas; en promedio estas personas son expuestas 37 veces al día (69'226,482 personas en total).

En un radio de 50 metros se expone a 176,519 personas, en promedio 19 veces al día (3'287,866 personas en total).

Las mismas personas son expuestas en múltiples ocasiones debido a que las rutas pasan varias veces por las mismas avenidas.

### 5.3.4 Principales Problemas Encontrados

En este escenario se puede ver que las rutas sí minimizan la población expuesta pero utilizan un corredor principal a partir del cual se van separando hacia sus destinos. Este corredor concentra la mayor parte de las rutas en prácticamente una sola. La misma población sería expuesta una y otra vez día tras día inevitablemente.

## 5.4 PROPUESTA 2, RUTAS CON MINIMIZACIÓN DE LA PONDERACIÓN DE LA DISTANCIA Y LA POBLACIÓN EXPUESTA

La propuesta 2 consiste en determinar el conjunto de rutas que minimizan una ponderación entre la población expuesta y la distancia recorrida. Para este escenario se utilizó un modelo de rutas de vehículos utilizando una ponderación de los dos atributos: la distancia entre arcos y la población expuesta por arco (50% población, 50% distancia).

En la figura 5.8 se muestra el conjunto de rutas de distribución que minimizan la ponderación de dos objetivos, la población expuesta y la distancia recorrida.

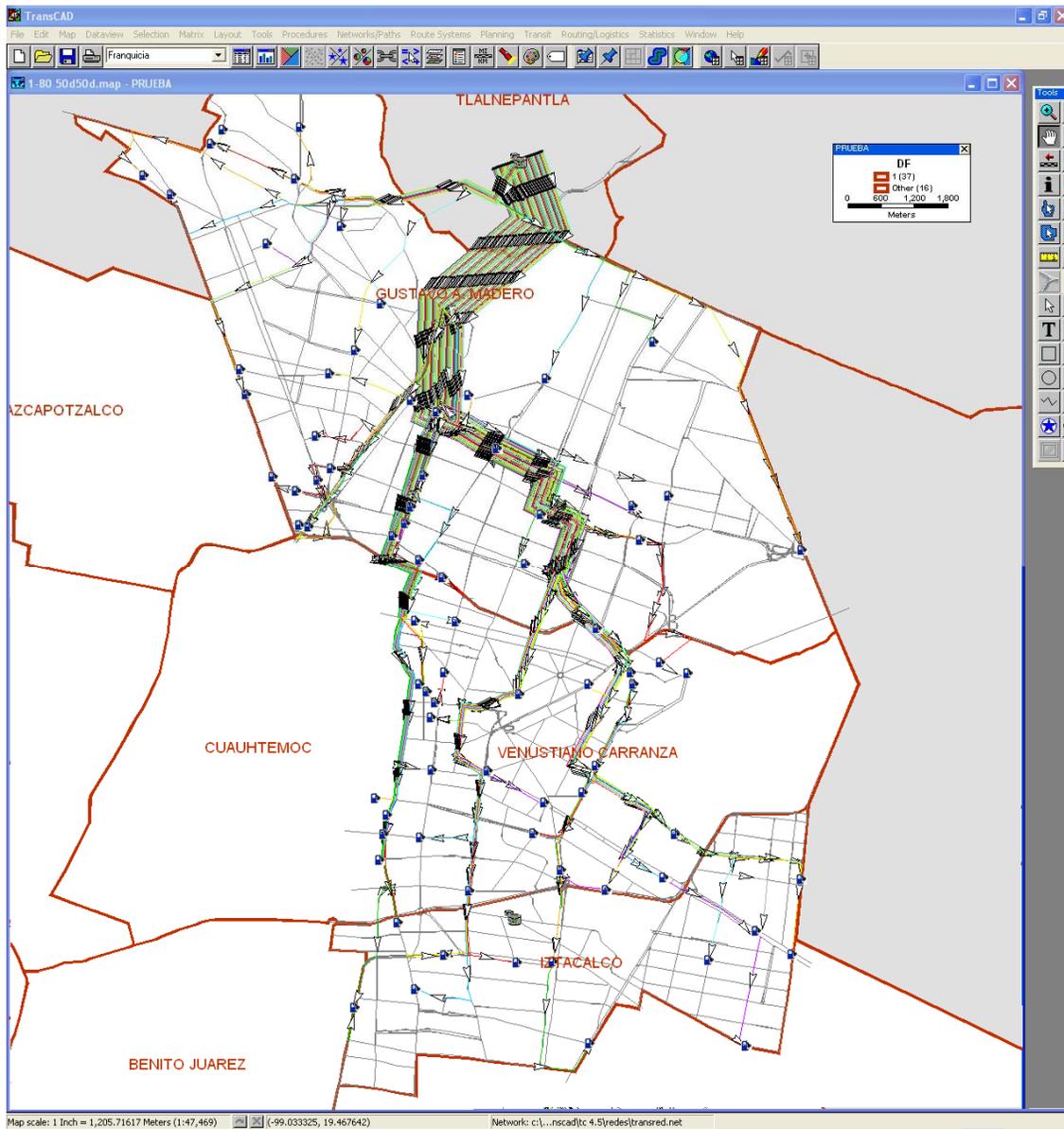


Figura 5.8 Simulación de rutas de distribución de gasolinas con minimización de la ponderación de población expuesta y distancia

Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

#### 5.4.1 Principales Avenidas Utilizadas

En la figura 5.9 se hace una clasificación de avenidas utilizadas y se muestran de color rojo las que son principalmente utilizadas en la distribución de gasolinas (de un 13 al 100 %). Estas avenidas son:

- A) Insurgentes norte (81 %)
- B) Acueducto de Guadalupe (71 %)
- C) Pelicano (45 %)
- D) Calzada de los misterios (24 %)
- E) Av. 503 (22 %)

En la misma figura de color naranja se muestran las vialidades que son utilizadas de un 6 al 12% de las rutas. Estas vialidades son:

- A) Anillo periférico (15 %)
- B) Av. del Trabajo (10 %)
- C) Hangares (11 %)
- D) Av. Gran Canal (11 %)

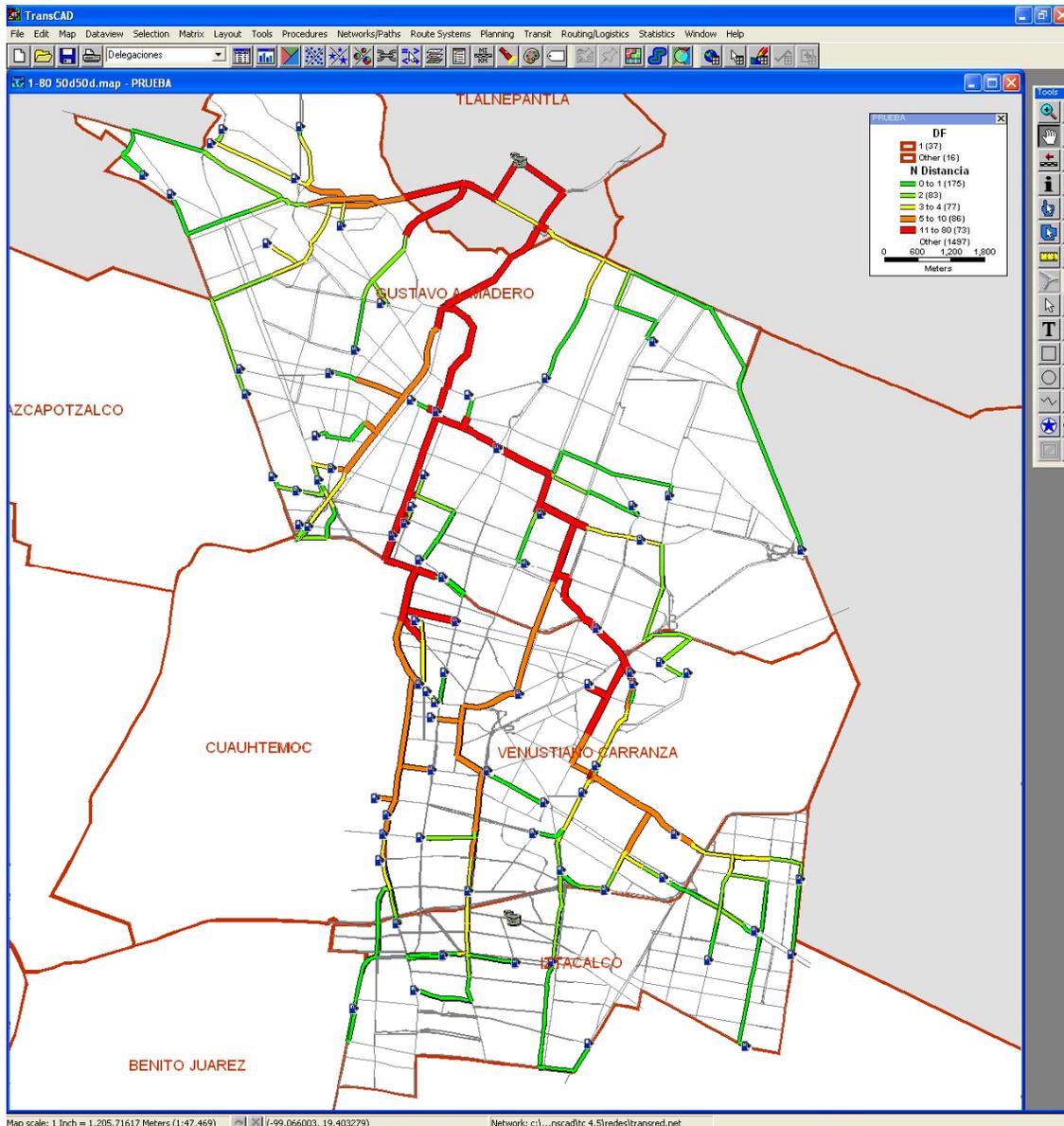


Figura 5.9 Clasificación de las principales vialidades utilizadas en las rutas con minimización de la ponderación de población expuesta y distancia

Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

### 5.4.2 Población Expuesta en la Propuesta 2

En la figura 5.10 se puede ver de primera impresión que las rutas de la propuesta 2 son una combinación entre las rutas actuales y las rutas de la propuesta 1, con una ligera tendencia más hacia la propuesta 1 que reduce la población expuesta.

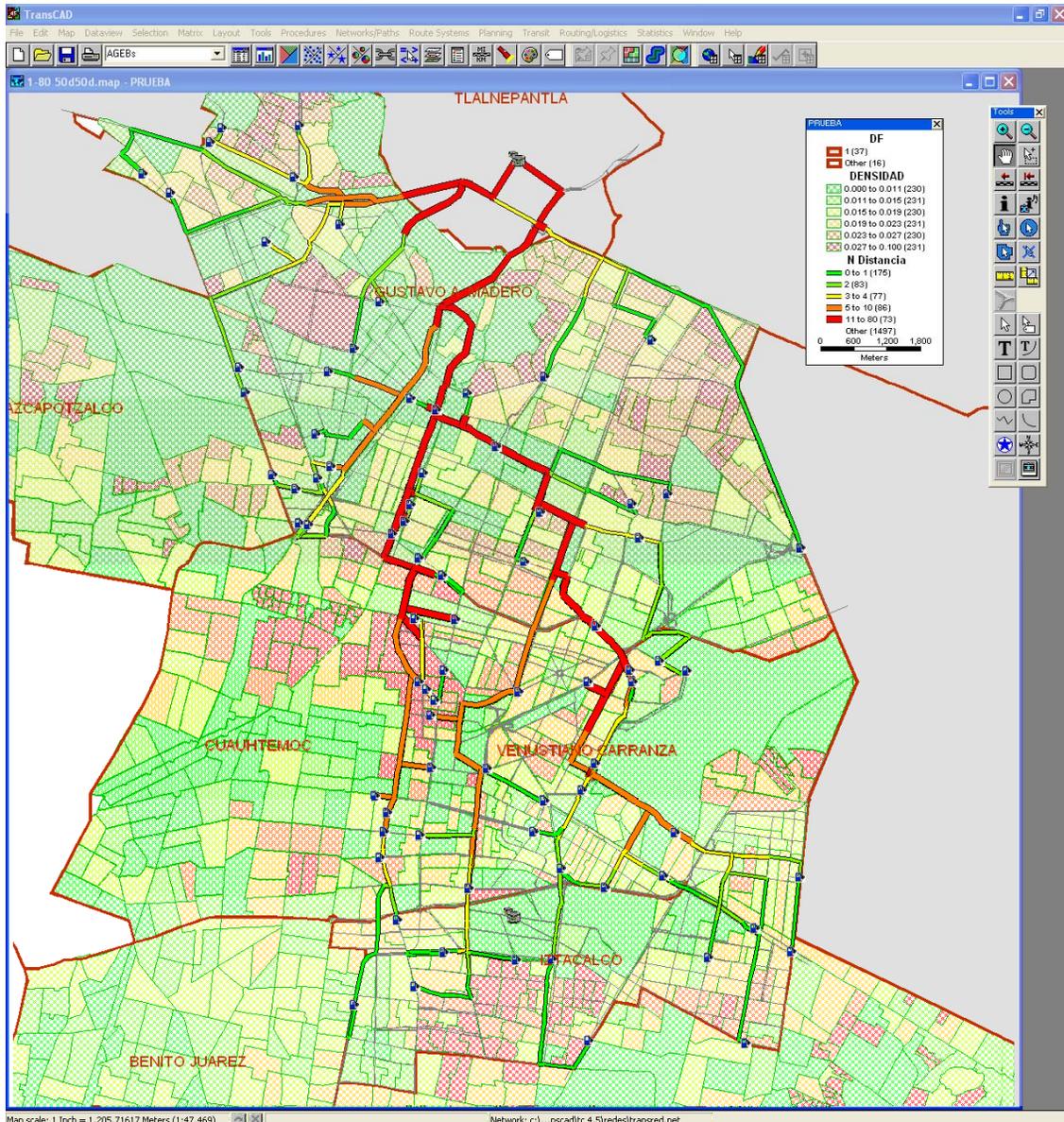


Figura 5.10 Población expuesta en las rutas de la propuesta 2 con minimización de la ponderación de población expuesta y distancia

Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

En la tabla 5.3 se muestra un ejemplo de las 10 rutas de la propuesta 2 que exponen a un mayor número de personas (Ver anexo C para el resto de las rutas). En esta tabla se puede ver que aunque sí hay una reducción de la población expuesta con respecto a las rutas actuales, la propuesta 1 reduce en mayor medida la población expuesta en un radio de 50 metros.

RUTA			PROPUESTA 2		
TAD	E S	Demanda	Km	P.E. 50m	P.E. 800m
San Juan	5035	6	136.62	140,135	2,559,587
San Juan	3685	6	132.42	128,622	2,451,184
San Juan	218	5	105.55	111,946	2,167,854
San Juan	4959	6	121.32	111,812	2,053,373
San Juan	97	6	85.42	109,106	1,734,200
San Juan	114	5	107.5	102,165	1,858,833
San Juan	4869	5	103.9	98,927	1,831,866
San Juan	2509	6	107.34	97,405	2,032,420
San Juan	2878	5	102.9	93,448	1,817,115
San Juan	205	5	97.5	88,978	1,602,691

Tabla 5.3 Ejemplo de las rutas de la propuesta 2  
Fuente: Elaboración propia

Para este escenario de distribución, la distancia total que se recorre diariamente por los autotranques es de 4,040 Km. y durante estos recorridos se expone en un radio de 800 metros a 1'949,367 personas, en promedio estas personas son expuestas 35 veces al día (68'942,127 personas en total).

En un radio de 50 metros se expone a 194,273 personas, en promedio 18 veces al día (3'530,049 personas en total).

Las mismas personas son expuestas en múltiples ocasiones debido a que las rutas pasan varias veces por las mismas avenidas.

#### 5.4.3 Análisis del Sistema de Rutas de la Propuesta 2

En la simulación de las rutas de la propuesta 2 (rutas con minimización de la ponderación de población expuesta y distancia) se encontraron 3 casos diferentes (Ver figura 5.11):

##### **Caso 1. Reducción de la población mediante rutas alternas**

En el 58 % de las rutas fue posible reducir la población mediante rutas alternas. A diferencia de la propuesta 1, el porcentaje de este caso fue menor debido principalmente a que esta propuesta sólo utiliza rutas alternas cuando se reduce la población expuesta (en promedio 33 %) y la distancia recorrida no se aumenta en más del 10 %.

En la figura 5.11 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 2511. La ruta actual (la línea de color negro) utiliza al Anillo periférico y da vuelta en la avenida Ingeniero Eduardo Molina; esto expone a una población (en un radio de 50 metros) de 44 mil personas con una distancia recorrida de 37 Km. La ruta de la propuesta 2 utiliza la avenida Insurgentes Norte y la avenida Acueducto de Guadalupe; con esta nueva ruta, la población expuesta es reducida de 44 mil personas a 28 mil personas (36 % menos) y la distancia actual cambia de 37 Km. a 42 Km. (13 % más).

##### **Caso 2. Utilización de las rutas actuales**

Para este escenario, en el 34 % de las rutas se utilizaron las rutas actuales.

En la figura 5.11 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 215.

##### **Caso 3. Reducción de la población mediante rutas alternas sin incrementar la distancia recorrida.**

En el 9% de las rutas fue posible reducir la población mediante rutas alternas sin incrementar la distancia recorrida.

En la figura 5.11 se muestra un ejemplo de este caso con la estación de servicio 5872. La ruta actual (línea de color negro) y la ruta de la propuesta 2 (línea de color azul) son prácticamente las mismas salvo una pequeña desviación en la avenida Acueducto de Guadalupe. La población expuesta es reducida de 27 mil a 26 mil (3% menos) y la distancia permanece igual.

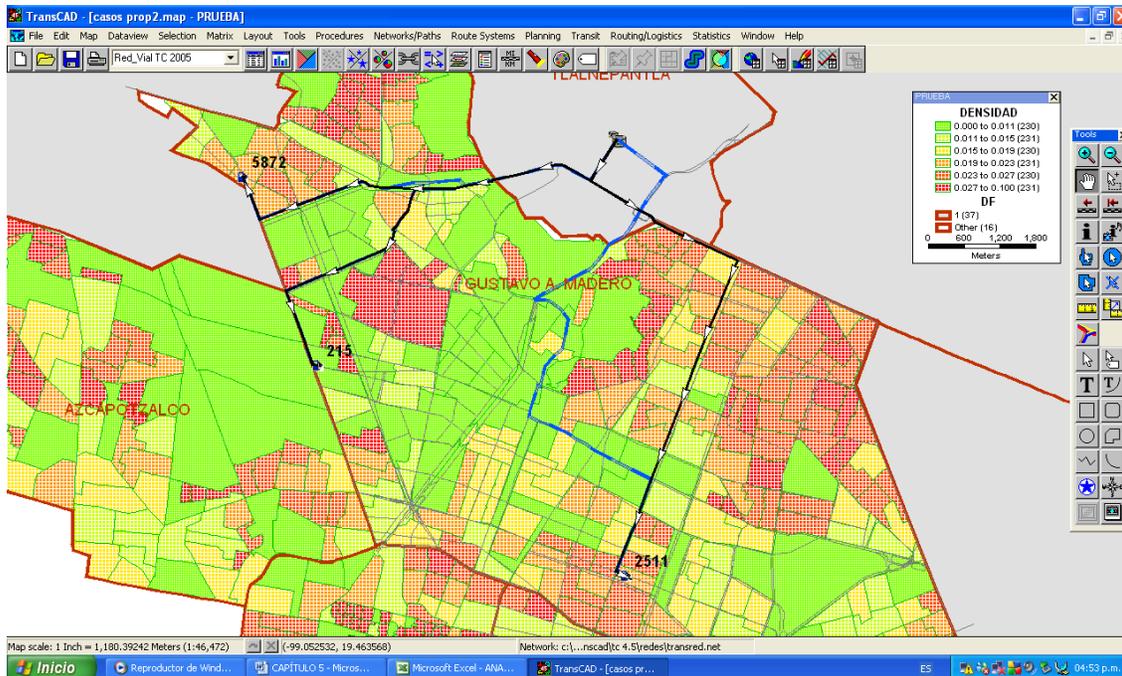


Figura 5.11 Casos encontrados en la propuesta 2  
Fuente: Elaboración propia utilizando TransCAD 4.5

#### 5.4.4 Principales Problemas Encontrados

En este escenario se puede ver que las rutas de la propuesta 2 también disminuyen la población expuesta aunque no en todos los casos y no en la misma proporción que la propuesta 1. Así mismo, en la figura 5.8 se puede ver que esta propuesta también hace una concentración de rutas, las cuales utilizan un corredor principal que se divide en dos casi a la mitad de las rutas, y a partir de estos dos corredores las rutas se van separando hacia sus destinos.

#### 5.5 COMPARACIÓN DE RUTAS

Para la comparación de rutas se evalúan los escenarios de las propuestas 1 y 2 con respecto al escenario actual, se utiliza los lineamientos actuales, para el caso de derrame 50 metros y para el caso de un incendio 800 metros (ver página 8-9).

Los puntos para la comparación de rutas son los siguientes (ver página 8):

- A) Población Expuesta (50 metros)
- B) Población Expuesta (800 metros)
- C) Distancia recorrida
- D) Misma población expuesta (50 metros)
- E) Misma población expuesta (800 metros)
- F) Población expuesta (50 metros) por kilómetro recorrido
- G) Población expuesta (800 metros) por kilómetro recorrido

### 5.5.1 Población Expuesta (50 metros)

En la figura 5.12 se muestra la población expuesta total en un radio de 50 metros para cada escenario.

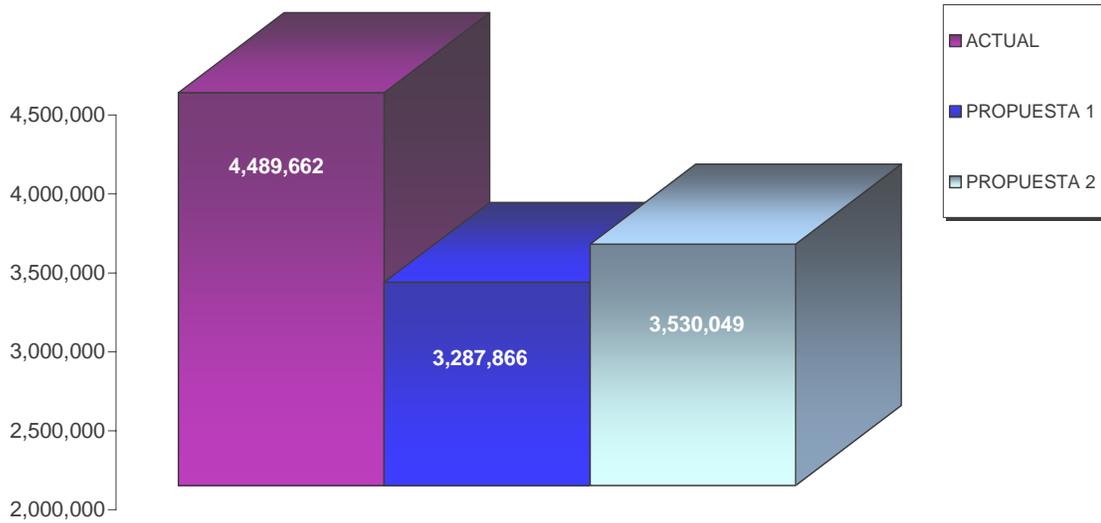


Figura 5.12 Población expuesta en un radio de 50 metros  
Fuente: Elaboración propia

La población expuesta actual en 50 metros es de: 4.4 millones de personas.  
Con la Propuesta 1 es de: 3.2 millones de personas (27 % menos).  
Con la Propuesta 2 es de: 3.5 millones de personas (21 % menos).

### 5.5.2 Población Expuesta (800 metros)

En la figura 5.13 se muestra la población expuesta total en un radio de 800 metros para cada escenario.

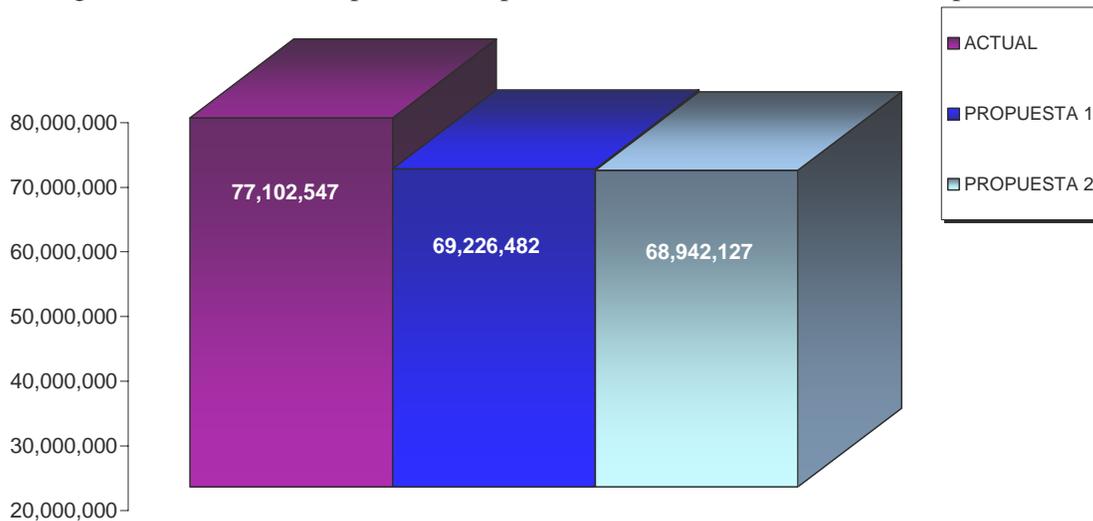
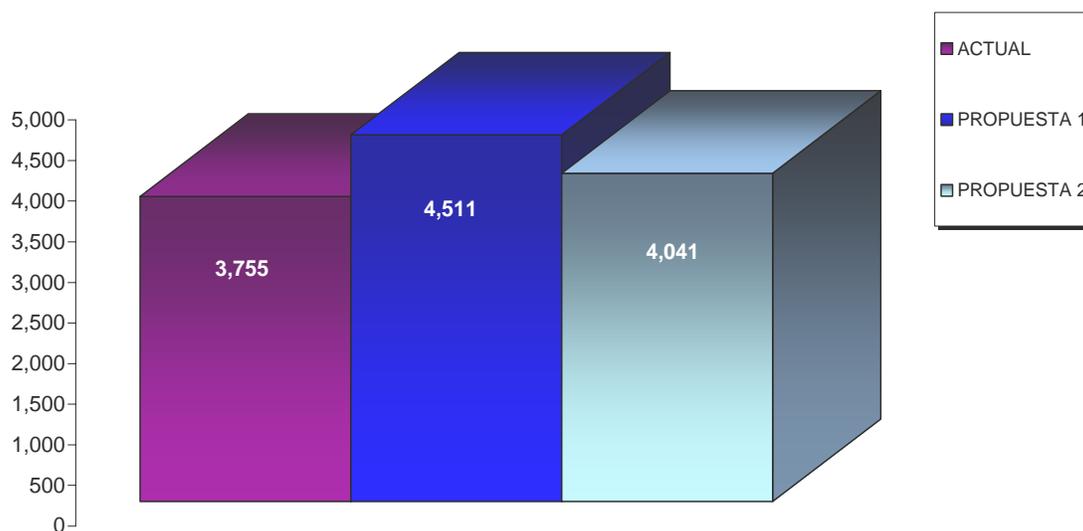


Figura 5.13 Población expuesta en un radio de 800 metros  
Fuente: Elaboración propia

La población expuesta actual en un radio de 800 metros es de: 77.1 millones de personas.  
Con la propuesta 1 es de: 69.2 millones de personas (10 % menos).  
Con la propuesta 2 es de: 68.9 millones de personas (11 % menos).

### 5.5.3 Distancia Recorrida

En la figura 5.14 se muestra la distancia recorrida para cada escenario.



Figura

5.14 Distancia total recorrida por la flota de autotanques en Km.

Fuente: Elaboración propia

Debido a que la situación actual de distribución se realiza de acuerdo con la distancia mínima, cualquier cambio en las rutas actuales incrementaría la distancia recorrida.

La distancia recorrida actual es de: 3,755 Km.

Con la propuesta 1 es de: 4,511 Km. (20% más).

Con la propuesta 2 es de: 4,041 Km. (8 % más).

### 5.5.4 Misma Población Expuesta (50 metros)

La misma población expuesta se refiere a la población que se encuentra dentro del área de exposición de una ruta sin importar la cantidad de veces que se exponga. Es decir si varias rutas circulan por la misma avenida la misma población expuesta únicamente es la población que se encuentra en esa área sin importar el número de rutas que circulen por esa avenida.

En la figura 5.15 se muestra la población expuesta única en 50 metros para todos los escenarios.

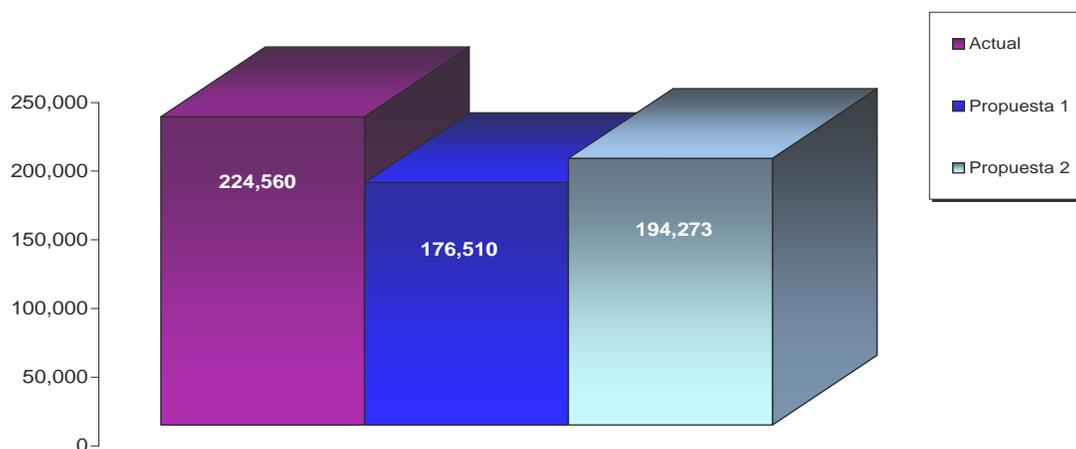


Figura 5.15 Población expuesta única en 50 metros

Fuente: Elaboración propia

Actualmente la población expuesta única en 50 metros es de: 224 mil personas.  
 Con la propuesta 1 es de: 176 mil personas (21 % menos).  
 Con la propuesta 2 es de: 194 mil personas (13 % menos).

### 5.5.5 Misma Población Expuesta (800 metros)

En la figura 5.16 se muestra la misma población expuesta en 800 metros.

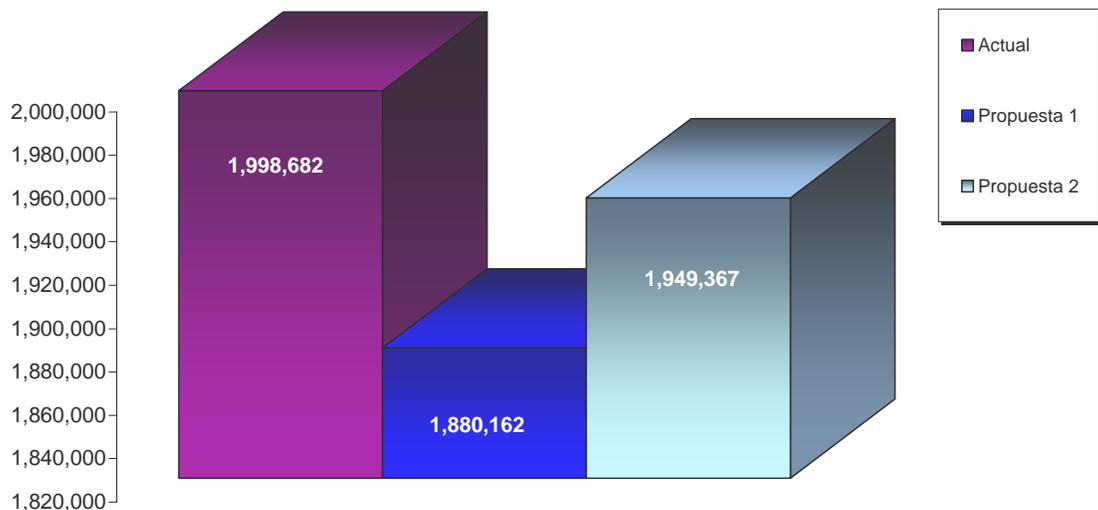


Figura 5.16 Población expuesta única en 800 metros  
 Fuente: Elaboración propia

Actualmente la misma población expuesta es de: 1.9 millones de personas.  
 Con la propuesta 1 es de: 1.8 millones de personas (6 % menos).  
 Con la propuesta 2 es de: 1.9 millones de personas (2 % menos).

### 5.5.6 Población Expuesta (50 metros) por Kilómetro Recorrido

En la figura 5.17 se compara la población expuesta en 50 metros por cada kilómetro recorrido

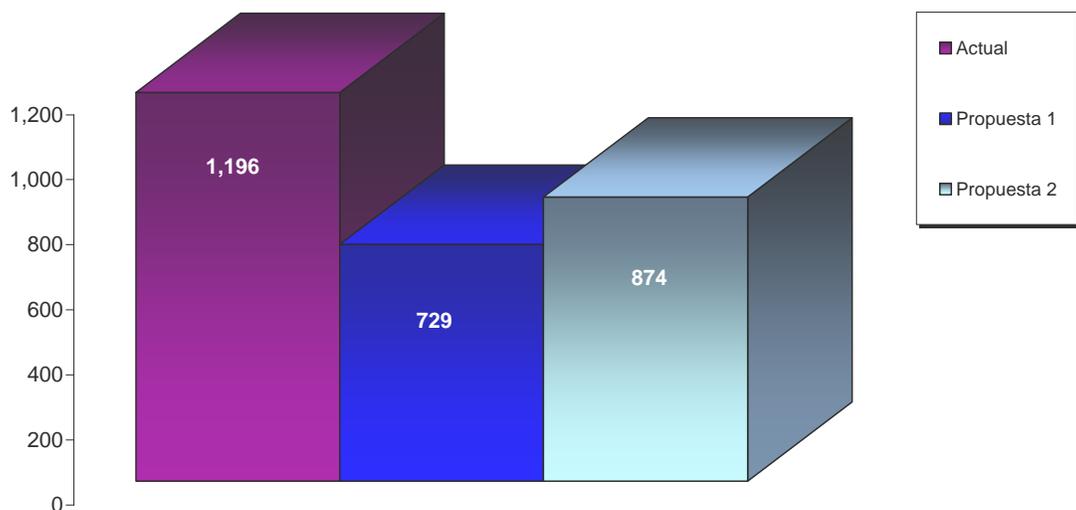


Figura 5.17 Población expuesta a 50 metros a la redonda por kilómetro recorrido  
 Fuente: Elaboración propia

Actualmente por cada Km. que se recorre se expone a 1,196 personas.

Con la propuesta 1 es de: 729 personas (39 % menos).

Con la propuesta 2 es de: 874 personas (26 % menos).

### 5.5.7 Población Expuesta (800 metros) por Kilómetro Recorrido

En la figura 5.18 se muestra la población expuesta en 800 metros por kilómetro recorrido.

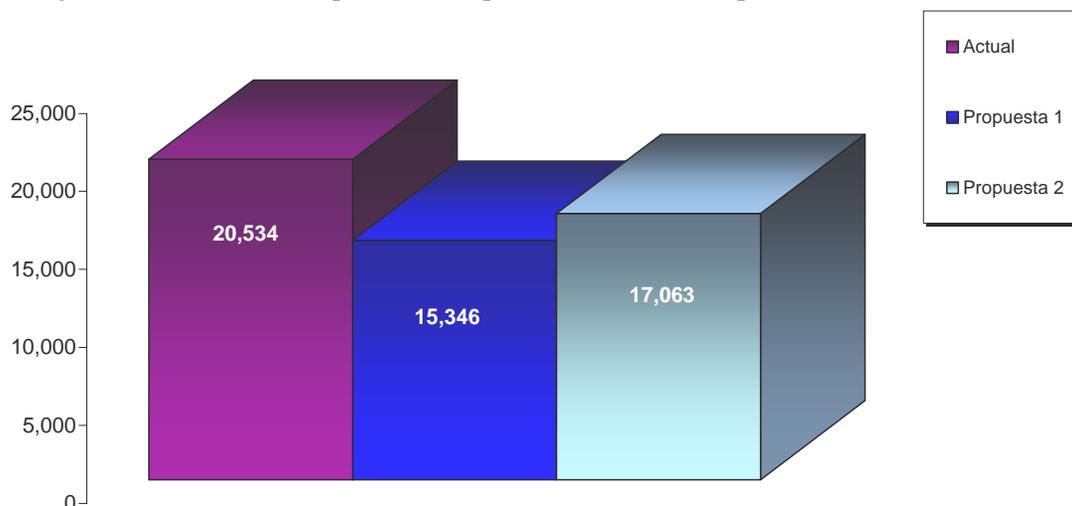


Figura 5.18 Población expuesta a 800 metros a la redonda por kilómetro recorrido

Fuente: Elaboración propia

Actualmente por cada Km. que se recorre se expone a 20 mil personas.

Con la propuesta 1 es de: 15 mil personas (25 % menos).

Con la propuesta 2 es de: 17 mil personas (16 % menos).

En este estudio se realizaron varias simulaciones utilizando diferentes anchos de banda para calcular la población expuesta en cada arco de la red vial. Esto para determinar un ancho de banda que minimizara la población expuesta en caso de derrame (50 metros) y en caso de incendio (800 metros). La primera prueba se realizó con un ancho de banda de 800 metros; las rutas obtenidas redujeron la población expuesta en 800 metros, sin embargo, la población expuesta en 50 metros en algunas rutas fue mayor en comparación con las rutas actuales.

Se hicieron pruebas a 800, 300, 100, 50 y 25 metros.

Los resultados generales mostraron que entre más grande era el ancho de banda, más se tendía a utilizar las rutas con distancias más cortas, ya que casi toda la población se expone de cualquier forma sin importar la ruta que elija.

También mostraron que si el ancho de banda es muy pequeño, se utilizan rutas alternas con distancias más largas. Si el ancho de banda es muy pequeño (50m y 25m) sólo se considera la población expuesta en las AGEBS inmediatas. Algunas rutas alternas reducen la población expuesta en 50 metros pero no la población expuesta en 800 metros, en comparación con las rutas actuales.

Los resultados presentados se obtuvieron con la banda de 100 metros. Esta banda permitió encontrar rutas que minimizaran la población expuesta principalmente en 50 metros y también en 800 metros.

---

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se utilizó un Sistema de Información Geográfica para el Transporte (SIG-T) y un modelo de transporte conocido como Problema de Rutas de Vehículos (VRP) para simular las rutas actuales de distribución y proponer rutas alternas de distribución de gasolinas en la ciudad de México (propuesta 1 y 2), tales que la menor cantidad posible de población quede expuesta en caso de un accidente en el transporte de gasolinas.

Es importante destacar que el hecho de elegir una ruta a lo largo de la cual se expone a un menor número de personas, no asegura que en caso de que ocurra un accidente éste se dé en un área con menor densidad de población. Pero si se elige una “ruta más segura”, en caso de que un accidente ocurra, las probabilidades de afectar a una mayor población serán menores.

En el caso de la ciudad de México, se pensó inicialmente que debido a sus grandes concentraciones de población y gran demanda de combustibles, no sería posible encontrar rutas alternas debido a que cualquier cambio en las rutas actuales conllevaría a un incremento en la distancia recorrida y aunque la ruta circulara por un área con menores densidades de población, con la distancia adicional que se tendría que recorrer en estas nuevas rutas, se estaría exponiendo una mayor población.

Se analizaron y compararon los resultados de población expuesta y distancia recorrida, de las rutas actuales contra las rutas de las nuevas propuestas (ver páginas 79-83). Tanto la propuesta 1 como la 2, mostraron que es factible reducir la población expuesta a través de la determinación de rutas alternas. Los resultados mostrados en este estudio proporcionan una alternativa a la planeación tradicional de rutas del transporte de gasolinas y demuestran que sí es posible reducir la población expuesta en el transporte de gasolinas mediante rutas alternas, incluso en grandes zonas urbanas como el caso de la ciudad de México, sin incrementar demasiado la distancia recorrida porque la reducción de la población expuesta también esta en función de la distancia que se recorre, una distancia adicional a la ruta mínima implica una exposición adicional de población.

Determinar cuál sistema de rutas es el mejor, dependió del criterio que se quiso adoptar; Este estudio mostró que si el principal interés es la seguridad de la población, entonces es aconsejable la utilización de la propuesta 1, frente a la propuesta 2 y a las rutas actuales. La seguridad proporcionada por las rutas de la propuesta 1 puede compensar el incremento en la distancia de estas nuevas rutas. El caso más extremo se presentó en la ES218 (ver anexo A), con un aumento de 7 Km. adicionales por viaje, lo que es equivalente a 14 minutos viajando a 30Km/hora (el incremento total fue de 36 Km. diarios en dicha estación de servicio, la cual tiene demanda estimada de 5 autotanques diarios). Con la propuesta 1 se logró reducir la población expuesta en un 27 % y 10 % en radios de 50 y 800 metros respectivamente, con un incremento en la distancia recorrida del 20 % (ver anexo A). Esta propuesta también mostró los mejores resultados en la población expuesta por Km. recorrido, con una reducción del 39 % y 15 % en radios de 50 y 800 metros, respectivamente.

La propuesta 2, que se basa en una ponderación de la distancia recorrida y la población expuesta, puede ser considerada como un balance de seguridad a la población y costos (los cuales son función de la distancia). Esta propuesta logró reducir la población expuesta (con respecto a la situación actual) en un 21 % y 11 % en radios de 50 y 800 metros respectivamente, con un incremento sólo del 7 % en las distancias recorridas (ver anexo A). De igual forma esta propuesta mostró reducciones en la población expuesta por Km. recorrido, del 27 % y 17% en radios de 50 y 800 metros, respectivamente (ver anexo A).

---

Por otro lado, si el criterio principal es reducir sólo los costos de transporte, sin tomar en cuenta la población expuesta al peligro, las rutas actuales con distancia mínimas representan la mejor opción, porque, sólo consideran las que representan el menor costo de transporte.

En México no existe limitación de uso vial en zonas urbanas para el transporte de sustancias peligrosas, y tampoco es posible asignar rutas a los vehículos de transporte de sustancias peligrosas. Una acción que se podría realizar sería prohibir la circulación por ciertas avenidas (total o parcialmente). El principal problema de esto es que una avenida puede mostrar diversas densidades de población a lo largo de los distintos segmentos que la forman, por lo que prohibir el acceso por completo a una vialidad podría limitar rutas que utilicen los segmentos de ésta con densidades bajas de población. Por lo tanto se deberá poner atención en la selección de los segmentos de vialidad a restringir. Por otro lado, en ocasiones, los puntos de demanda se encuentran sobre vialidades dentro de las zonas con mayores densidades. Así que se tendrían que proporcionar permisos sólo a aquellos transportistas que indispensablemente tengan que circular en estas vías, lo que requiere analizar todos los destinos de demanda de sustancias peligrosas, para determinar permisos a todos los transportistas que sí tengan destinos en zonas con mayores densidades.

La población que tendría que ser evacuada en caso de un accidente de gasolinas, de acuerdo con los lineamientos actuales (800 metros en caso de incendio) sería un promedio de 30,000 personas en la ciudad de México pudiendo llegar hasta 55,000 personas dependiendo de dónde ocurra el accidente (ver páginas 59-63). La dificultad de una evacuación tan grande, conlleva a recomendar revisar y establecer nuevas distancias a evacuar en zonas urbanas en caso de un accidente. Las distancias establecidas en la Guía de Respuesta Rápida en caso de Emergencia (US DOT, 2004), son aplicables a accidentes en el transporte de sustancias peligrosas en carreteras y zonas no urbanas. Actualmente, no existe ningún otro procedimiento, ni norma oficial mexicana que establezca las distancias de evacuación en el caso de que el accidente ocurra en una zona urbana por lo que si llegara a suceder no se tendría un procedimiento específico a seguir.

Este estudio sólo toma en consideración la población residente. Se recomienda para futuros trabajos e investigaciones considerar la población residente así como la población en tránsito. También se recomienda plantear escenarios con ventanas de tiempo, para determinar si es suficiente el tiempo para realizar la distribución de gasolinas durante horarios no pico.

El objetivo de este estudio fue determinar rutas alternas que en caso de accidente afecten la menor población posible y reduzcan los costos de transporte y dicho objetivo se logró porque las nuevas propuestas encontraron rutas alternas de distribución, que reducen la población expuesta en comparación con las rutas actuales y que también reducen los costos de transporte. Se espera que los resultados de este trabajo puedan contribuir a la definición de nuevas y mejores estrategias en la planeación de rutas de sustancias peligrosas. Los principios de este trabajo son de aplicación general y pueden ser tomados como base para futuros estudios, no sólo para el transporte de gasolinas sino también para el transporte de otras sustancias peligrosas en zonas urbanas.

## ANEXO A

A continuación se muestran las distancias y la población expuesta en 50 y 800 metros a lo largo de cada ruta que arrojó el software TransCAD.

RUTA			ACTUAL			PROPUESTA 1			PROPUESTA 2		
TAD	E S	Demanda	Km	P.E. 50m	P.E. 800m	Km	P.E. 50m	P.E. 800m	Km	P.E. 50m	P.E. 800m
San Juan	4	5	57	74,739	1,267,524	58	50,642	1,077,550	58	50,654	1,077,645
San Juan	5	2	10	11,561	185,148	15	6,060	201,462	10	11,560	185,148
San Juan	26	5	30	33,029	513,803	36	13,651	464,084	36	13,650	464,180
San Juan	38	2	24	23,961	438,736	29	23,741	553,262	24	23,961	438,736
San Juan	59	4	65	87,282	1,436,796	81	77,570	1,574,361	65	87,282	1,436,796
San Juan	60	3	36	42,208	761,695	36	42,208	761,639	36	42,208	761,695
San Juan	73	3	26	27,687	455,471	30	13,113	379,413	27	14,177	362,827
San Juan	88	2	25	36,472	590,946	30	27,352	559,817	30	27,351	559,854
San Juan	91	4	62	81,072	1,411,740	71	62,839	1,343,774	71	62,834	1,343,852
San Juan	94	3	26	15,709	361,466	26	15,709	361,411	26	15,709	361,466
San Juan	95	3	37	42,974	763,393	37	42,974	763,338	37	42,974	763,393
San Juan	96	6	80	103,219	1,849,034	95	75,857	1,745,076	95	75,856	1,745,186
San Juan	97	6	84	109,106	1,734,200	103	82,820	1,858,133	84	109,106	1,734,200
San Juan	106	4	34	19,796	437,285	34	19,796	437,212	34	19,796	437,285
San Juan	114	5	98	141,200	2,294,592	123	94,603	1,752,728	108	102,165	1,858,833
San Juan	131	4	28	13,538	300,324	28	13,538	300,247	28	13,538	300,324
San Juan	136	4	53	67,343	1,068,869	64	62,864	1,200,719	53	67,343	1,068,869
San Juan	137	2	25	30,058	522,473	25	30,058	522,437	25	30,058	522,473
San Juan	159	3	27	17,033	400,660	27	17,033	400,605	27	17,033	400,660
San Juan	199	2	13	6,002	140,469	13	6,002	140,431	13	6,002	140,469
San Juan	205	5	88	126,014	1,901,867	113	81,421	1,496,587	98	88,978	1,602,691
San Juan	208	3	46	58,580	980,066	57	51,297	1,086,593	46	58,580	980,066
San Juan	214	5	46	50,387	827,644	53	26,097	690,997	49	27,871	673,237
San Juan	215	4	33	19,667	477,399	35	18,610	533,938	33	19,668	477,399
San Juan	218	5	92	134,712	2,252,677	128	101,179	2,074,649	105	111,946	2,167,854
San Juan	219	3	43	55,570	911,989	56	48,538	1,008,102	43	55,570	911,989
San Juan	298	3	43	55,495	906,847	56	48,463	1,003,035	43	55,495	906,847
San Juan	2490	5	44	38,999	569,959	44	38,140	569,588	44	38,139	569,588
San Juan	2506	5	84	122,768	1,960,870	109	75,818	1,465,097	94	83,375	1,571,203
San Juan	2509	6	93	124,775	2,134,236	107	97,425	2,032,307	107	97,405	2,032,420
San Juan	2511	4	37	44,502	758,975	47	28,597	708,017	43	28,591	631,772
San Juan	2513	3	58	78,560	1,244,123	83	64,893	1,330,579	58	78,564	1,244,123
San Juan	2515	4	69	92,459	1,583,491	88	57,795	1,266,098	76	61,326	1,310,285
San Juan	2519	4	52	60,800	1,147,648	57	43,358	939,885	57	43,357	939,957
San Juan	2748	4	53	59,913	1,116,706	67	41,625	856,410	59	42,469	909,017
San Juan	2766	2	15	14,510	246,690	16	5,489	185,262	16	5,489	185,299
San Juan	2783	4	48	57,437	1,119,392	53	40,593	918,926	53	40,592	918,998
San Juan	2798	4	66	95,812	1,501,761	87	60,138	1,127,423	74	66,183	1,212,306
San Juan	2878	5	96	115,246	2,076,714	119	85,892	1,711,010	103	93,448	1,817,115
San Juan	2917	3	28	41,899	659,327	35	24,806	561,212	35	24,806	561,267
San Juan	2971	4	64	73,940	1,369,995	83	50,454	1,077,419	70	56,500	1,162,313
San Juan	2973	6	27	8,339	321,839	27	8,339	321,839	27	8,339	321,839
RUTA			ACTUAL			PROPUESTA 1			PROPUESTA 2		
TAD	E S	Demanda	Km	P.E. 50m	P.E. 800m	Km	P.E. 50m	P.E. 800m	Km	P.E. 50m	P.E. 800m

San Juan	3046	4	38	47,765	788,110	47	30,442	690,641	43	31,295	631,485
San Juan	3051	5	28	30,700	489,005	28	30,700	489,005	28	30,701	489,005
San Juan	3130	3	55	76,106	1,224,911	76	54,458	1,169,420	62	60,867	1,200,699
San Juan	3181	4	33	36,470	633,554	39	20,564	506,271	39	20,564	506,345
San Juan	3333	5	43	25,594	614,701	46	24,272	685,377	43	25,595	614,701
San Juan	3359	4	38	41,258	790,385	40	24,011	612,634	40	24,019	612,707
San Juan	3382	3	19	15,100	296,766	20	14,673	306,432	19	15,100	296,766
San Juan	3451	2	27	28,064	490,689	31	16,275	404,632	30	16,819	404,923
San Juan	3500	4	28	38,264	545,816	31	16,863	343,831	31	16,863	343,908
San Juan	3685	6	122	175,321	2,860,977	151	123,325	2,384,912	132	128,622	2,451,184
San Juan	4099	4	59	70,436	1,273,018	77	46,460	978,928	65	52,995	1,065,335
San Juan	4332	4	61	79,445	1,379,418	81	52,779	1,127,573	69	56,312	1,171,770
San Juan	4386	2	15	13,548	237,527	17	4,658	182,534	16	4,697	178,713
San Juan	4498	4	37	18,266	505,377	37	18,080	506,308	37	18,080	506,381
San Juan	4647	3	44	57,145	1,012,659	51	43,466	961,230	51	43,468	961,287
San Juan	4869	5	97	120,729	2,091,463	119	91,371	1,725,758	104	98,927	1,831,866
San Juan	4900	4	59	75,937	1,259,216	74	66,237	1,410,712	59	75,937	1,259,216
San Juan	4959	6	113	137,974	2,364,890	140	102,744	1,926,045	121	111,812	2,053,373
San Juan	5035	6	125	187,393	3,027,154	156	132,600	2,431,055	137	140,135	2,559,587
San Juan	5104	4	22	17,340	367,965	22	16,675	359,899	22	16,674	359,899
San Juan	5284	4	45	62,206	995,886	45	42,084	772,151	45	42,117	772,227
San Juan	5412	5	49	59,638	746,401	73	39,923	1,004,306	49	59,638	746,401
San Juan	5656	5	27	30,325	532,697	27	30,325	532,697	27	30,325	532,697
San Juan	5680	4	45	48,590	1,001,907	51	32,805	802,253	51	31,146	794,203
San Juan	5736	6	42	50,513	819,383	47	25,389	548,300	47	25,389	548,411
San Juan	5753	2	18	8,073	240,106	18	7,980	240,572	18	7,980	240,609
San Juan	5798	3	37	42,174	825,684	41	29,092	669,861	41	29,091	669,917
San Juan	5832	4	58	68,398	1,252,715	76	47,425	1,000,839	64	50,958	1,045,035
San Juan	5872	4	29	27,065	395,427	38	23,464	597,842	29	26,375	395,133
San Juan	5959	3	31	33,764	519,789	35	19,190	445,773	32	20,411	426,542
San Juan	6735	3	12	5,018	122,713	13	4,625	128,643	12	5,018	122,713
San Juan	7320	3	30	37,074	605,566	34	21,324	480,122	34	21,324	480,178
San Juan	7664	3	42	43,505	736,667	48	25,821	607,580	47	26,638	608,018
San Juan	7996	3	27	16,412	361,708	27	16,412	361,653	27	16,412	361,708
San Juan	7997	5	23	11,312	287,084	25	10,606	307,998	23	11,312	287,084
San Juan	7998	4	25	26,069	393,157	27	21,834	414,177	26	22,403	401,289
San Juan	7999	4	23	14,836	360,379	25	12,948	305,838	23	14,836	360,379
San Juan	8000	4	70	97,459	1,646,835	98	68,567	1,440,009	80	79,246	1,578,956
<b>Promedio</b>			<b>47</b>	<b>56,121</b>	<b>963,782</b>	<b>56</b>	<b>41,098</b>	<b>865,331</b>	<b>51</b>	<b>44,126</b>	<b>861,777</b>
<b>Total</b>			<b>3755</b>	<b>4,489,662</b>	<b>77,102,547</b>	<b>4511</b>	<b>3,287,866</b>	<b>69,226,482</b>	<b>4041</b>	<b>3,530,049</b>	<b>68,942,127</b>
<b>Reducción de PE</b>							<b>1,201,795</b>	<b>7,876,065</b>		<b>959,612</b>	<b>8,160,420</b>
<b>% de Reducción</b>							<b>27%</b>	<b>10%</b>		<b>21%</b>	<b>11%</b>
<b>Incremento de Km</b>						<b>756</b>			<b>286</b>		
<b>P.E. / Km recorrido</b>				<b>1,196</b>	<b>20,534</b>		<b>729</b>	<b>15,346</b>		<b>874</b>	<b>17,063</b>
<b>Única PE</b>				<b>224,560</b>	<b>1,998,682</b>		<b>176,510</b>	<b>1,880,162</b>		<b>194,273</b>	<b>1,949,367</b>
<b>Exposiciones por persona</b>				<b>19.99</b>	<b>38.58</b>		<b>18.63</b>	<b>36.82</b>		<b>18.17</b>	<b>35.37</b>

---

## REFERENCIAS

### Artículos

Alvarenga G.B., Mateus G.R., Tomic G., (2007) “A genetic and set partitioning two-phase approach for the vehicle routing problem with time Windows” *Computers & Operations Research* 1561–1584

Badra N.M., (2007) “Sensitivity Analysis of Transportation Problems” *Journal of Applied Sciences Research* 3 668-675

Eunjeong Choia, Dong-Wan Tchab, (2007) “A column generation approach to the heterogeneous fleet vehicle routing problem” *Computers & Operations Research* 2080–2095

Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2001): “Cálculo de rutas óptimas para el transporte de residuos tóxicos y peligrosos”, *GeoFocus*

Jozefowicz Nicolas, Semet Frédéric (2008) “An evolutionary algorithm for the vehicle routing problem with route balancing” *European Journal of Operational Research*

Olivera O. Viera, (2007) “Adaptive memory programming for the vehicle routing problem with multiple trips” *Computers & Operations Research* 28–47

Pisinger David, Ropke Stefan, (2007) “A general heuristic for vehicle routing problems” *Computers & Operations Research* 2403 – 2435

Ruiz Rubén, (2004) “A decision support system for a real vehicle routing problem” *European Journal of Operational Research* 153 593-606

Shih-Wei Lin, Zne-Jung Lee, Kuo-Ching Ying, Chou-Yuan Lee, (2008) “Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem” *Expert Systems with Applications*

### Tesis

Acevedo Alvarez Verónica, (2007) “Propuesta de una unidad médica para incrementar la productividad de los operadores de auto-tanques en una Terminal de almacenamiento y distribución” UNAM

Mejía Albarrán Manuel (2006) “Estudio preliminar para la instalación de un sistema de recuperación de vapores en una estación de servicio en el valle de México” UNAM

Rivera Franco Jesús, (2000) “Aspectos generales de la administración y del transporte de hidrocarburos empleados por petróleos mexicanos en las terminales petroleras” UNAM

Sanchez Juárez Reyna (2007) “Análisis de riesgos en una Terminal de recibo, almacenamiento y distribución de hidrocarburos” UNAM

---

## **Informes**

Informe de rendición de cuentas de la administración pública federal (Gobierno Federal, 2000-2006)

Informe de Actividades de la Subdirección de Almacenamiento y Distribución (Pemex, 2000-2006)

Infraestructura de plantas de proceso, sistemas de ductos y terminales de Almacenamiento y distribución. (Subdirección de producción Pemex Refinación, Agosto 2006)

La Guía de Respuesta a Emergencias 2004 (DOT, SCT, TC, CIQUIMET, 2004)

Reglamento para el transporte terrestre de materiales y residuos peligrosos. 7 de abril de 1993 (Gobierno Federal, 1993)

II Censo de Población y Vivienda (INEGI, 2005)

## **Libros**

Ball Michael, Magnanti Tom, Monna Clide, Nemhauser George, (1995) "Handbook in operations research and management science" Volume 7 Ed. North-Holland

Ellsworth Bruce Davis, (2001) "GIS : a visual approach" Ed. Onword press 2ª edición.

Goleen Bruce L.; Assad A.A., (1998) "Vehicle routing: methods and studies"  
Ed. North Holland 1998

Gutin Gregory and Kluwer Punnem Abraham P., (2002) "The traveling Salesman Problem and its variations" Ed. Academia Publishers

Jean Claude, (2000) "Geographic information systems in transportation research Part C" Ed. Thill TA1145 G46

Lantada Zarzosa Nieves, Nuñez Andres Amparo, (2002) "Sistemas de información geográfica: practicas con ArcView" Ed. UPC

Ordoñez Galan Celestino, Martinez-Alegria Lopez Roberto, (2003) "Sistemas de informacion geográfica: aplicaciones practicas con Idrisi32 al análisis de riesgos naturales y problemáticas medioambientales" Ed. Alfa Omega.

Peña Llopis Juan, (2006) "Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio" Departamento de Ecología Universidad de Alicante. Ed. ECU

Taha Hamdy A., (1994) "Investigación de Operaciones" Ed. Alfaomega 5ª edición

Tor Bernharden, (1999) "Geographic Information Systems" Ed. John Wiley & Sons Inc.

---

## Web

Procuraduría Federal del Consumidor, <http://www.profeco.gob.mx/precios/quienesquien.asp> consultado el 1° de julio del 2008

Secretaría de Comunicaciones y Transporte, [http://www.sct.gob.mx/fileadmin/normatividad/transporte\\_aereo/47NOM-004-SCT%202000.pdf](http://www.sct.gob.mx/fileadmin/normatividad/transporte_aereo/47NOM-004-SCT%202000.pdf) NOM-004-SCT/2000, consultado el 1° de julio del 2008

Petróleos Mexicanos, <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionid=7>, consultado el 1 de julio del 2008

Fideicomiso para el mejoramiento de las vías de comunicación del Distrito Federal, <http://www.fimevic.df.gob.mx/problemas/1diagnostico.htm> consultado el 1° de julio del 2008.

Bellini Franco, [http://www.investigacion-operaciones.com/modelo\\_de\\_transporte.htm](http://www.investigacion-operaciones.com/modelo_de_transporte.htm), consultado el 1 de julio del 2008

Caliper, <http://www.caliper.com/TransCAD/desarrollodeaplicaciones.htm>, consultado el 1° de julio del 2008.

Rodríguez Villalobos Alejandro, [http://personales.upv.es/arodrigu/IDI/Rutas\\_transp.pdf](http://personales.upv.es/arodrigu/IDI/Rutas_transp.pdf), Integración de un SIG con modelos de cálculo y optimización de rutas de vehículos CVRP y software de gestión de flotas, consultado el 1° de julio del 2008.

Ortiz Gabriel, <http://www.gabrielortiz.com/index.asp?Info=012>, consultado el 1° de julio del 2008