
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



PROGRAMA DE POSGRADO
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS

**“ANÁLISIS DEL FLUJO DE TRANSPORTE DE PASAJEROS EN EL CORREDOR
VIAL INSURGENTES CIUDAD DE MEXICO”**

Tesis que, para obtener el grado de maestro en ingeniería sustenta el:
Ing. Cuauhtémoc Maldonado Palomar.

Tutor:
M. en I. José Antonio Rivera Colmenero.

Cd. Universitaria, México D. F, octubre del año 2012.



Cuauhtémoc Maldonado Palomar.
Tesis de Maestría.



JURADO ASIGNADO.

Presidente: Dr. Acosta Flores José de Jesús.
Secretario: Dr. Aceves García Ricardo.
Vocal: M. en I. Rivera Colmenero José Antonio.
1er. Suplente: Dr. Dartois Girald Laurent Yves Georges.
2do. Suplente: Dr. Chías Becerril Luis.

Ciudad universitaria, México Distrito Federal

Tutor de Tesis.

M. en I. José Antonio Rivera colmenero.



Cuauhtémoc Maldonado Palomar.
Tesis de Maestría.



Nuevamente muchísimas gracias a la Universidad Nacional por su inmensa generosidad.

A Leonardo.

A Rommel.

A mi hijo que aun no ha nacido.

Para ustedes sea el futuro, con mis mejores deseos: Que el futuro sea bueno y que sea largo.



TABLA DE CONTENIDOS.

INTRODUCCIÓN.

Antecedentes.	6
Objetivos.	7
Alcances.	7
CAPÍTULO I. MÉTODOS DE ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL.	
1.1 Modelos de demanda.	9
1.1.1 Generación de viajes.	13
a. Factor de crecimiento.	14
b. Modelo de Generación de viajes por regresión lineal.	16
c. Correlación simple.	17
1.1.2 Distribución.	18
a. Modelos de factor de crecimiento.	20
b. Modelo de Gravedad.	22
1.1.3 Selección modal.	25
Modelo logit.	26
a. Modelo logit binario.	27
b. Modelos logit multinomial y logit condicional.	30
c. Modelo logit jerárquico.	33
1.1.4 Asignación de transito	34
1.2 Función de desempeño de una vialidad.	35
1.3 Redes de transporte y redes viales.	39
1.3.1 Algunos conceptos de redes de transporte.	41
1.3.2 Rutas Mínimas en Redes de Transporte.	41
1.3.3. Modelado de la red.	45
1.4 Modelos de asignación.	46
1.4.1 Algoritmo de STOCH.	48

CAPÍTULO II. LA AVENIDA INSURGENTES Y SU ENTORNO.

2.1 La Zona Metropolitana Del Valle De México.	50
2.2 El Uso de suelo en el Distrito Federal.	58
2.3 Delimitación geográfica del corredor.	60
2.4 Modos de transporte en el corredor y Métodos de aforo.	64



CAPÍTULO III. PERSPECTIVAS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS EN LA AVENIDA INSURGENTES.

3.1 Funcionamiento actual del corredor de pasajeros.	66
3.1.1 Velocidad y tiempo de traslado.	75
3.1.2 Periodo e intervalo.	78
3.2 La Avenida Insurgentes y su capacidad.	80
3.3 Nivel de servicio de la vialidad Insurgentes.	86
3.4 Funcionamiento del corredor en el horizonte posible a 10 años.	87

CAPÍTULO IV.

Conclusiones.	95
Recomendaciones.	97

REFERENCIAS.	98
Bibliografía.	
Mesografía.	



INTRODUCCIÓN

Actualmente, el transporte de pasajeros en la Ciudad de México, se encuentra en una etapa crítica debido en gran parte, a la falta de espacio para la circulación de vehículos y personas. Mientras que la zona metropolitana ha crecido, no solo en el sentido horizontal (extendiéndose en lo territorial), sino también en lo vertical, (con desarrollo de edificaciones de gran altura y mayor capacidad); La infraestructura vial y de transporte, se ha mantenido prácticamente intacta en los últimos 50 años, propiciando así un déficit de transporte de pasajeros, particularmente en las horas pico.

Es de hecho, un problema global, la reducción de espacios ante el aumento de la población mundial, que se agudiza en zonas de alta concentración humana; en donde además, la demanda de transporte no es constante, sino que varía, según la hora, el día, y la época del año. De ahí la complejidad de diseñar esquemas de transporte eficientes y sustentables, que satisfagan las necesidades de transporte, cumplan con su función de productividad y resulten costeables.

ANTECEDENTES

La zona metropolitana del valle de México, es una de las regiones de población humana con mayor concentración en el mundo: en ella habitan más de 20 millones de personas. Así mismo, se considera al corredor Insurgentes como uno de los más importantes dentro de esta capital, entre otras razones, porque es el de mayor longitud (28.8 kilómetros), y es el eje troncal que recorre toda la ciudad en el sentido norte-sur. La actividad económica y cultural a lo largo de este corredor, es muy amplia por lo que presenta un afluente humano muy grande, quizá el más grande del país.

Si bien, en las últimas décadas se tuvieron algunos avances en materia de programas de construcción y operación de espacios públicos de transporte, esto no ha sido suficiente; las medidas implementadas, pronto han sido rebasadas, debido en gran parte a los efectos no deseados de la aplicación de programas como el "Hoy no circula". Es el mismo caso cuando se trata de construir vialidades sobre otras que ya existen (segundos pisos). Estas soluciones agravan aun más el problema, ya que fomentan la adquisición de nuevos vehículos automotores con lo que aumenta la tasa de motorización y disminuyen la movilidad.

Actualmente el flujo de personas en la vialidad Insurgentes (en vehículo o en transporte público), es lento, los vehículos no superan los 10 kph en algunos tramos de la vialidad. Ocasionando pérdidas económicas en la sociedad y magnificando las externalidades negativas relativas a los congestionamientos viales.

En este trabajo se abordó de manera global el tema de transporte urbano de pasajeros a fin de obtener algunas respuestas, sobre el funcionamiento del sistema en una de las vialidades de mayor relevancia en la Ciudad de México; su problemática actual y la que afrontará en el mediano plazo.

OBJETIVOS



Se pretende caracterizar el transporte de pasajeros del corredor Insurgentes en la Ciudad de México con la finalidad de modelar su comportamiento y determinar su operatividad en el tiempo presente y en el mediano plazo.

ALCANCES

Debido a la complejidad y magnitud territorial del Valle de México, nos limitamos a analizar el comportamiento del corredor insurgentes, en toda su longitud, considerando desde la autopista México – Pachuca, hasta el entronque con Viaducto Tlálpán. Los medios de transporte analizados son los que se clasifican como público y privado (bajo este esquema se pretende dar una perspectiva de todos los viajes relacionados con el corredor).

Para el análisis, se detalla una red que determina los volúmenes de usuarios de cada fase, se utiliza la Encuesta de Origen Destino del Distrito Federal, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI 2007). Una vez que se tenga completada la red se procede a establecer el funcionamiento global y parcial de la red en el escenario actual, y posteriormente en el horizonte de 10.



ABSTRACT.

The metropolitan zone of the valley of Mexico, is one of the regions of human population with major concentration in the world: in her, more than 20 million persons live. Likewise, it is considered to the corridor Insurgents as one of the most important inside this capital, between other reasons, because it is that of major length (28.8 kilometres), and is the main axis that crosses the whole city in the sense north - south. The economic and cultural activity along this corridor, is very wide for what presents a human very big tributary, probably the biggest of the country.

Though, in the last decades some advances were had as for programs of construction and operation of public spaces of transport, this has not been sufficient; the implemented measures, soon they have been exceeded, owed largely to the effects not wished of the application of programs as " Today it does not circulate ". It is the same case when it is a question of constructing vialidades on others that already exist (the second floors). These solutions aggravate furthermore the problem, since they promote the acquisition of new self-propelled vehicles with what it increases the rate of motorización and diminish the mobility.

Nowadays the persons' flow in the vialidad "Insurgents" (in vehicle or in public transport), is slow, the vehicles do not overcome the 10 kph in certain sections of the vialidad. Causing economic losses in the company and praising the negative externalidades relative to the road congestionamientos.

In this work there was approached in a global way the topic of passengers' urban transport in order to obtain some answers, on the functioning of the system in one of the vialidades of major relevancy in the Mexico City; his current problematics and the one that it will confront in the medium term.



La mayor parte de la gente encontraría bastante ridícula la imagen de nuestro universo como una torre infinita de tortugas, pero ¿en que nos basamos para creer que lo conocemos mejor?
Stephen W. Hawking (1942).

CAPÍTULO I. METODOS DE ANALISIS ESPACION-TEMPORAL.

1.1 Modelos demanda.

La modelación aplicada al análisis y a la planeación de transportes es una ciencia nueva. La riqueza metodológica vinculada a esta cuestión proviene de más de 30 años de investigación interdisciplinaria, abarcando conocimientos de ingeniería, economía, geografía, sociología, psicología, estadística, matemática aplicada, análisis de sistemas, etc. Como en toda ciencia, la distancia entre la teoría y la práctica no es muy grande. Los desarrollos teóricos más recientes son en general, rápidamente involucrados en la estructura de las aplicaciones verificadas en la práctica, sin que el enfoque global sea cuestionado o ampliamente revisado. Modelar para la planeación de transportes requiere el desarrollo de distintas actividades que la anteceden. Algunas de las más importantes para los objetivos de este trabajo son presentadas a continuación.

Durante los últimos 50 años se ha desarrollado y consolidado una metodología para elaborar modelos de demanda del transporte, así como de la oferta representada por los sistemas de transporte. Durante este período, mejoras conceptuales fueron introducidas en distintas etapas de este proceso metodológico. Sin embargo, la estructura básica adoptada en el enfoque del problema se mantuvo, agregando las mejoras que se han originado por la investigación, mismas que han sido muy útiles en las aplicaciones prácticas. El proceso de modelado generalmente es tratado en cuatro etapas distintas:

- Generación de viajes o estimación de la demanda.
- Distribución de viajes en la red de transporte.
- División o selección modal, según los modos existentes en la red.
- Distribución a las redes de transportes.

Los resultados obtenidos en estas etapas alimentan un procedimiento de evaluación; además cada una de ellas, tiene un objetivo definido en la simulación. El encadenamiento entre las etapas, la posible no consideración de alguna de ellas, o la sustitución por procedimientos alternativos para lograr los mismos resultados, dependen del objetivo de cada estudio, de la metodología adoptada y de la información disponible, entre otros factores.

- La primera etapa se basa en información socioeconómica y demográfica de la población o de las actividades económicas en el área de estudio, además de los datos referentes a las características del uso, ocupación o capacidad productiva del suelo en la región. La



demanda de transporte, puede estar representada en viajes de personas, vehículos o toneladas, en un determinado período de tiempo (hora, día, año, etc.).

- Después de establecer los niveles globales de la demanda para cada tipo de flujo de tránsito (en los períodos seleccionados para el análisis), se realiza la distribución que corresponde a la estimación de la intensidad del intercambio que existe entre cada pareja de zonas específicas. A partir de este momento, se conoce el patrón espacial de la demanda por transporte para cada tipo de flujo analizado, representado en un conjunto de matrices de distribución de la demanda o de viajes. Estas son matrices cuadradas, de dimensión igual al número de zonas de tráfico (pueden ser incluidas zonas externas a las áreas de estudio). La celda de la matriz correspondiente a la línea i (zona de origen o producción i) y columna j (zona de destino, atracción o consumo j) contiene un estimado de la demanda por transportes, entre las zonas de tráfico i y j .
- En la siguiente etapa del modelado, la selección (o división) modal, atribuye a cada modalidad de transporte la parte probable de la demanda que absorberá. En esta etapa deben ser diferenciados los flujos que, en función de sus características, son cautivos de ciertos modos de transporte, de aquellos supuestamente competitivos, es decir, que se pueden seleccionar entre alternativas modales. La información resultante se representa en una serie de matrices de demanda o de viajes, para cada modo considerado y tipo de flujo (y período). Estas matrices posteriormente deben ser distribuidas a las redes que representan la oferta de transporte. De esta etapa, se obtienen los valores de la demanda en cada tramo del sistema de transporte representado, así como su nivel de desempeño, considerando su carga estimada.
- En la última etapa de modelado, la distribución de viajes; se hace la interacción entre la oferta, representada a través de redes de transporte modales, y la demanda, sintetizada en las matrices de la demanda; ya cambiadas en viajes de personas o vehículos. El conjunto completo de información permite la evaluación de las alternativas, buscando seleccionar la que mejor atiende los objetivos y metas establecidas como parte del proceso de planeación. Así como elaborar las estimaciones de costos y beneficios de cada alternativa de política de transporte simulada.

De manera progresiva, desde hace 50 años se ha resuelto el problema de la modelación, inicialmente mediante métodos agregados, en los que se planteaba el problema (a partir de preferencias reveladas y preferencias declaradas) de manera secuencial en el que intervenían tres submodelos:

- a. Generación atracción.
- b. Distribución y reparto modal.
- c. Asignación de tráfico.



A este método se le conoce como modelo clásico, y enfrente en su momento diversas críticas, principalmente debidas a su escasa precisión y por ende baja confiabilidad.

Nuevos modelos aparecieron en la década de los 70's, en los que se precisa la modelación de la demanda de transporte, sobre la base de una serie de decisiones tomadas por un individuo particular, el cual tiene una serie de alternativas, y tomará la que maximice su utilidad considerando sus restricciones. En este planteamiento el tiempo y el costo económico forman parte de la utilidad que el individuo pretende maximizar. Según los autores, existe evidencia empírica que demuestra la validez de tales afirmaciones.

Uno de los postulados principales que modifica la teoría clásica, es el que afirma, que **la utilidad se deriva de las características de los bienes y no de los bienes en sí mismos** (Ortuzar 1994). En este sentido, el consumo del individuo está determinado por la cantidad que consume y por la elección de las alternativas discretas, representadas con sus atributos, los cuales reflejan sus características. De esta forma, el problema del consumidor es:

$$\begin{aligned} & \text{Max } U(Y, Q) \\ & Y, j \end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned} & \sum P_i Y_i + c_j \leq I \\ & Y_i \geq 0 \quad j \in J \end{aligned}$$

En donde:

P_i e Y_i son los precios y cantidades del bien i , de naturaleza continua.

Q_j representa el vector de características de la alternativa discreta j .

c_j el costo de dicha alternativa.

I , es el ingreso del individuo, y J el conjunto de alternativas disponibles.

De acuerdo a lo expresado, se demuestra que la elección depende del nivel de ingreso del individuo. En donde según la teoría de la utilidad aleatoria:

- Los individuos se comportan como un "*homoeconomicus*". es decir, actúan de forma racional y poseen información perfecta. Por esta razón, eligen la alternativa que les proporciona la máxima utilidad, dadas sus restricciones.
- Dado un conjunto general de alternativas A , las restricciones a las que se enfrenta cada individuo q determinan el conjunto de alternativas que éste tiene disponible $A_q \subseteq A$.



- Cada individuo asocia una utilidad U , (utilidad indirecta condicional truncada) a cada una de las alternativas $A_i \in A_q$.

Adicionalmente se plantea la existencia de un conjunto \bar{X}_{iq} de variables o atributos que representan los aspectos medibles que considera un individuo al tomar decisiones. En este contexto, la probabilidad de que un individuo seleccione una alternativa, está dada por:

$$P_{iq} = P(U_{iq} \geq P_{jq}; \quad \forall A_i \in A_q \quad j \neq i)$$

La naturaleza aleatoria de las funciones de utilidad, se deben a diversos factores, principalmente los siguientes.

- Atributos no observados.
- Variaciones en las preferencias del individuo.
- Errores en la medición de los atributos.

Finalmente Mc fadden, afirma que la interpretación del modelo de utilidad aleatoria se expresa como la suma de la componente observable y la aleatoria (Mc fadden 1999).

$$U_{iq} = V_{iq} + \varepsilon_{iq}$$

En donde V_{iq} , es la utilidad representativa que el individuo q , asocia a la alternativa A_i . Expresada en términos del vector \bar{X}_{iq} ; en tanto que ε_{iq} , es la componente aleatoria. De esta forma, la variable dependiente es el indicador del comportamiento del individuo y es del tipo probabilístico. El modelo puede representarse mediante, el diagrama de árbol de la figura 1.1:



Figura. 1.1 Diagrama de árbol para establecer la probabilidad de elección de un viajero.



En la fase de desarrollo de los modelos se espera, como resultado final, obtener un instrumento de análisis que represente de la mejor manera posible el sistema que se espera simular. Este instrumento deberá ser sensible a las políticas y a las variables de decisión consideradas, y compatibles con el tipo y la calidad de las informaciones disponibles. Esto define el grado de detalle en la representación de la oferta y de la demanda, además de la formulación teórica del modelo. En la aplicación de los modelos, se espera que éstos sean útiles como instrumentos auxiliares en la toma de decisiones sobre la planeación de transporte. Para esto, ellos deben ser entendidos por los usuarios (planeadores, aquellos que toman las decisiones), y tener una aplicación lo más sencilla posible, y deben de ofrecer las respuestas buscadas. Su rol debe facilitar la decisión, y no presentarse como una barrera para el planificador.

1.1.1 Generación de viajes.

El análisis de generación de viajes o de demanda es especialmente importante, ya que en esta etapa de la planeación del transporte, se define la demanda total que debe ser atendida en los distintos años horizonte de estudio. El objetivo de la aplicación de los modelos de generación de viajes, es permitir la estimación para cada año horizonte considerado, la demanda total producida y atraída por cada zona de tráfico del área de estudio y su entorno, en un determinado período de tiempo. Los modelos de generación de demanda relacionan las variables que describen a la población o actividad económica de cada zona, las que caracterizan de su patrón de uso y ocupación del suelo, con el potencial de la zona como unidad productora (modelos de producción) y consumidora (modelos de atracción) de viajes. Como consecuencia de que la demanda por transporte se deriva por la demanda de otras actividades, los modelos de generación de viajes, deben desarrollarse independientemente para cada tipo de flujo.

- Para el transporte de pasajeros, este procedimiento considera el hecho de que diferentes funciones de la demanda se asocian a diferentes categorías socioeconómicas, y a la participación en actividades distintas identificadas por motivos de viajes diferentes.
- Para el transporte de carga, se busca caracterizar la demanda específica de cada producto o grupo de productos de alguna manera homogéneos. La capacidad de análisis y la disponibilidad de datos imponen limitaciones prácticas a este tipo de desagregación.

En el caso de la planeación a nivel regional, las técnicas de generación de viajes muchas veces son distintas de las utilizadas en el medio urbano. Esto se explica por la importancia de los flujos de mercancías, que tienen una dinámica fuertemente vinculada a la actividad económica de la región, del país y del exterior. Por lo expuesto, los procedimientos para la estimación de la demanda futura son semejantes a los métodos de proyección de variables económicas. Abarcan una serie muy grande de información cuantitativa y cualitativa, generalmente asociada con aspectos de ubicación (como la cercanía a los mercados de materias primas o de consumidores, la complementariedad entre los procesos productivos, la posición estratégica con respecto al sistema de transporte) o coyunturales (evolución de los mercados, comportamiento de los



competidores diversos). Así, solamente para algunos productos es posible o se aconseja, la utilización de los modelos tradicionales de estimación de generación de la demanda por transporte. La alternativa empieza a caracterizarse como la proyección exógena del potencial de producción y atracción/consumo de cada zona para cada año horizonte, para los demás productos considerados. La proyección de la generación exógena de la demanda por transporte y de las variables sociales, económicas y otras utilizadas en los modelos, se elabora en función de los escenarios de evolución determinados para el estudio. A continuación se representan las principales ideas asociadas al uso de los modelos de generación de la demanda por análisis de regresión lineal múltiple.

a. Factor de crecimiento

Definiciones:

- i) Viaje: Es el movimiento en un sentido desde un punto de origen a un punto de destino.
- ii) Viajes basados en el hogar (HB): Son aquellos que tienen un extremo en el hogar de la persona que realiza el viaje, independientemente de que este sea el origen o el destino.
- iii) Viajes no-basados en el hogar (NHB): Son aquellos que no tienen un extremo en el hogar del viajero.
- iv) Producción de viaje: Se define como el extremo hogar de un viaje HB, o el origen de un viaje NHB.

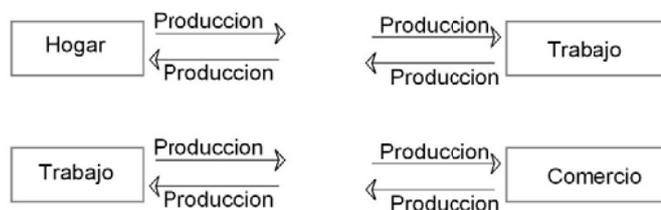


Figura 1.2.

- v) Atracción de viaje: Se define como el extremo no-hogar de un viaje HB o el destino de un viaje NHB.

En la actualidad se está utilizando, cada vez con mayor frecuencia, otra serie de conceptos relacionados, tales como tour y cadena, que corresponden mejor a la idea de que la demanda por transporte es derivada y depende fuertemente de la demanda por realizar ciertas actividades. Se ha demostrado, y en la mayoría de los casos es obvio, que se debieran obtener mejores modelos de generación si se distinguen y separan los viajes con distintos propósitos.

- i) Viaje HB: Normalmente se separan en cinco categorías: trabajo, compras, estudio, social y recreacional, y otros propósitos.



- ii) Viajes NHB: Normalmente no se separan, ya que suelen alcanzar solo el 15 – 20 % de los viajes.

Este modelo se aplica para estimar el número de viajes para alguna de las siguientes categorías: Viajes personales y de carga; producción o atracción de viajes, y esta dado por:

$$T_i = F_i * t_i$$

Donde:

- T_i : Son los viajes futuros en la zona de estudio i ,
 t_i : Son los viajes actuales en la zona de estudio i ,
 F_i : Es el factor de crecimiento de la zona de estudio i .

La estimación de F_i , está relacionada con variables tipo: *población (P)*, *ingreso (I)* y *propiedad de auto (C)*.

$$F_i = \frac{f(P_i^d, I_i^d, C_i^d)}{f(P_i^c, I_i^c, C_i^c)}$$

Donde: f , es función una multiplicativa sin parámetros, y los subíndices representan: $d \rightarrow$ año de diseño y $C \rightarrow$ año actual, Por ejemplo: Sea una zona con 250 hogares con auto y 250 hogares sin auto. La generación promedio de viajes para cada grupo es:

Hogares con auto: 6.0 viajes/día.
Hogares sin auto: 2.5 viajes /día.

Bajo estas condiciones el número de viajes/día actuales se puede obtener como:

$$t_i = (250)(2.5) + (250)(6.0) = 2125 \text{ Viajes/día.}$$

Ahora, suponer que en el futuro todos los hogares tendrán auto, y que las condiciones en cada grupo permanecerán constantes, en consecuencia, el factor de crecimiento estimado será:

$$C_i^d = 1.0 \quad \text{ Toda la población tiene auto.}$$

$$C_i^c = 0.5 \quad \text{ La mitad de la población tiene auto.}$$

$$F_i = \frac{C_i^d}{C_i^c} = \frac{1.0}{0.5} = 2$$

Entonces el número de viajes futuros será: $T_i = F_i * t_i = (2)(2125) = 4250 \text{ viajes/día}$



La estimación por este método no es muy precisa, ya que si usamos la información del promedio de viajes y hacemos la suposición de que las condiciones permanecerán constantes, se pueden estimar el número futuro de viajes de la siguiente forma:

$$T_i = (500)(6) = 3,000 \text{ viajes/día}$$

Lo cual significa que el método de factor de crecimiento, puede sobre estimar el número total de viajes, como en este ejemplo en un 42%. En la práctica se usa el modelo de factor de crecimiento, para estimar los viajes externos hacia otra área o zona, ya que éste tipo de viajes son solo del 15 al 20% del total.

b. Modelo de Generación de viajes por Regresión Lineal

La estimación de la generación de demanda por transporte, abarca la previsión de dos términos: la producción, que es la demanda originada o producida en cada zona de tráfico y la atracción, que es la demanda destinada o consumida en cada zona. Los modelos de generación que se basan en el análisis de regresión lineal múltiple, buscan establecer una relación lineal entre un conjunto de variables explicativas (independientes) y una variable que se pretende explicar (dependiente), en general la producción o la atracción de la demanda por zona. La forma general del modelo se presenta a continuación:

$$G_i = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots$$

Donde:

- ↪ G_i : Producción o atracción de demanda en la zona i para el tipo de flujo considerado, expresada en viajes de personas, vehículos o toneladas, por unidad de tiempo (hora, día, año).
- ↪ x_1, x_2, x_3, \dots : Variables explicativas de la generación de demanda (o transformaciones de las variables originales como logaritmos, potencias, etc.).
- ↪ $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$: Son los parámetros que describen el comportamiento de la demanda, determinados en la *calibración* del modelo por análisis de regresión.

Un ejemplo puede utilizarse para ilustrar la aplicación del concepto. Para el tipo de flujo "*viajes motivo trabajo*", la producción de la demanda diaria por transporte P_i , puede definirse en función de la población Po_i y del ingreso I_i para cada zona de tráfico i :

$$P_i = a_0 + a_1Po_i + a_2I_i$$



Por su parte, la atracción de la demanda anual por transportes A_j , puede expresarse como función del empleo en industria EI_j y el empleo en comercio EC_j de cada zona de tráfico J :

$$A_i = b_0 + b_1 EI_j + b_2 EC_j$$

La calibración o ajuste del modelo, es la estimación de los parámetros del modelo a través del análisis de regresión lineal.

Es común que formulaciones alternativas se lleven a cabo, para seleccionar aquella que represente mejores resultados estadísticos, de entre las formulaciones compatibles con la teoría y la comprensión de la realidad, que está siendo modelada. Para la aplicación de este tipo de modelos, se requiere que las variables explicativas sean proyectadas, para cada zona de tráfico y para cada año horizonte. Así, es posible estimar la producción y atracción necesarias, para alimentar la etapa de distribución de la demanda por transporte.

c. Correlación simple

El objetivo de este modelo es, estimar la variable dependiente y , a partir de una combinación lineal de una variable independiente x . Esto es: $y = a + bx$, donde a y b son los parámetros a estimar. Para estimar los parámetros a y b , se tienen las siguientes expresiones:

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n}$$

Y el coeficiente de correlación r_{xy} que mide la bondad del ajuste, dado como:

$$r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{[n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2] * [n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2]}}$$

El cual analiza la relación entre las dos variables, como $-1 \leq r_{ij} \leq 1$. Donde se tienen en general, los siguientes casos extremos:

- 1, indica correlación negativa perfecta.
- 1, indica correlación positiva perfecta.
- 0, indica correlación nula.



1.1.2 Distribución.

La distribución de la demanda o de viajes, es el segundo paso del proceso de proyección de la demanda y, su objetivo es estimar los intercambios de viajes entre las zonas de tráfico, en el área de estudio y su entorno. Los modelos utilizados en esta etapa, usan las estimaciones de producción y atracción de viajes por zona de tráfico, y algún tipo de información sobre la estructura de la distribución de la demanda. El resultado de aplicar un modelo de distribución, es una **matriz de demanda**, donde cada celda contiene una medida de la intensidad del intercambio de viajes, entre un par de zonas.

Destinos		1	2	3	D...j	Σ_j
Orígenes	1	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{1j}	O_1
	2	t_{21}	t_{22}	t_{23}	t_{2j}	O_2
	3	t_{31}	t_{32}	t_{33}	t_{3j}	O_3
	O...i	t_{i1}	t_{i2}	t_{i3}	t_{ij}	O_i
Σ_i	D1	D2	D3	Dj	$\Sigma_{ij} = T$	

Donde:

T_{ij} : Viajes originados en la zona i con destino a la zona j .

T_{ii} : Número total de viajes intrazonales (diagonal principal).

O_i : Número total de viajes originados en la zona i .

D_j : Número total de viajes atraídos por la zona j .

Las matrices de viajes pueden ser desagregadas, esto es: por tipo de persona, por modo, etc. Así entonces:

T_{ij}^{kn} : Número de viajes generados en la zona i por el modo k y el tipo de persona n .

O_i^{kn} : Número total de viajes originados en la zona i por el modo k y el tipo de persona n .

Un modelo se dice *doblemente restringido*, si se tiene información para estimar O_i y D_j . Y simplemente restringido, si solo se cuenta con alguno de ellos, aun que generalmente en viajes urbanos se requiere que ambos casos estén restringidos, así se tiene que:

$$\sum_j O_i = \sum_i D_j$$

Con lo que se asegura que el total de viajantes diarios se desplazan de su casa a su trabajo -por ejemplo- y ellos mismos retornan de su trabajo a su casa.



Costo generalizado de viaje.

Es una función lineal de los atributos del viaje, ponderada por coeficientes de importancia relativa, tal como la percibe el viajero, el costo puede ser considerado en términos de: tiempo, distancia o unidades monetarias. En donde para un modo k , tenemos:

$$C_{ij}^k = a_1 t_{ij}^v + a_2 t_{ij}^w + a_3 t_{ij}^t + a_4 t_{nij} + a_5 F_{ij} + a_6 \emptyset_j + \delta$$

t_{ij}^v , es el tiempo de viaje en vehículo, entre i y j .

t_{ij}^w , es el tiempo de viaje caminando hacia o desde la parada (estación).

t_{ij}^t , es el tiempo de espera en altos.

t_{nij} , es el tiempo de intercambio, si existe alguno.

F_{ij} , es el Precio o costo del viaje, entre i y j .

\emptyset_j , es el costo de estacionamiento, asociado con el viaje de i a j .

δ , es una penalidad modal, representa todos los demás atributos no incluidos, por ejemplo: seguridad, confort, conveniencia. Y $a_1, a_2, a_3 \dots a_6$, son ponderaciones asociadas a cada elemento de costo, con dimensiones apropiadas para convertir todos los atributos a unidades comunes por ejemplo: tiempo, dinero, etc.

La idea básica del procedimiento en los modelos de distribución de viajes, es que la demanda generada en cada zona sea "*distribuida*" entre las zonas de atracción. Esta etapa se puede asociar a la selección del destino, lo cual se hace en función del potencial de atracción de cada posible zona de destino.

El potencial de atracción de cada zona depende de dos factores:

- ~> La estimación de atracción de la demanda asociada a la zona,
- ~> La competencia con las demás zonas del área de estudio.

Esta competencia entre zonas, está relacionada con la capacidad de atracción de cada una y con información de la estructura de la matriz de distribución. Los modelos de distribución más utilizados, diferenciados por el tipo de información que utilizan como entradas de datos, y los resultados que ofertan son:



- **Factor de crecimiento**, el cual se formula a treves de una *matriz de viajes actual o anterior*, con la función objetivo definido (número de viajes futuros). Su objetivo es estimar la distribución futura de viajes para cada par de origen-destino. Debido a las características de los elementos de entrada y el proceso de cálculo, este método modela únicamente la distribución de viajes en una red y no tiene sensibilidad alguna a los costos asociados a cada desplazamiento en la red, así por ejemplo el impacto de una modificación en la política de transporte de una ciudad, no puede ser evaluada mediante este método.
- **Gravitacionales**. En principio este modelo utiliza una matriz de costos de viaje (tiempo, dinero, etc.) para cada par origen-destino. Además la función objetivo (número de viajes futuros), está relacionada de tal forma que es posible predecir la distribución y número de viajes en la red a partir de la función objetivo, en condiciones de variación de costo tanto económicos como en tiempos de recorrido, etc.

a. Modelos de factor de crecimiento.

Utilizan una matriz actual (o de un período anterior) como base, para realizar la proyección de la distribución de la demanda; esta matriz es sucesivamente corregida, utilizándose *factores de crecimiento*, basados en la evolución estimada de la producción y atracción de viajes de cada zona, como base para el año de estimación.

En estos casos la estructura de la matriz base, influye significativamente sobre la solución final. La principal ventaja de estos modelos es, su relativa simplicidad para ser utilizados con computadora, además de la cantidad reducida de información que requieren. La mayor desventaja que tienen es, que son insensibles a cambios en la oferta de transporte. Se utiliza, cuando se requiere una aproximación únicamente por crecimiento poblacional. Dependiendo de la información disponible, se pueden usar diferentes métodos para estimar los futuros patrones de viaje.

- a. Factor de crecimiento uniforme. Solo se requiere de una razón de peso general, para toda el área de estudio y se aplica a todas las celdas de la matriz de viajes, esto es:

$$T_{ij} = \tau t_{ij} \text{ para todo } i, j. \text{ Donde:}$$

T_{ij} : Viajes futuros (a estimar),

t_{ij} : Viajes actuales,

$$\tau = \frac{T}{t} : \text{Razón de expansión sobre el número total de viajes anteriores.}$$

- b. Factor de crecimiento con una sola restricción (simplemente acotado). Este modelo se usa cuando se tiene información solo sobre el crecimiento de viajes generados en cada



O_i , por ejemplo viajes de compras. De igual forma, cuando solo se tiene información sobre el crecimiento esperado de viajes atraídos por cada D_j . Entonces:

$$T_{ij} = \tau_i t_{ij} \text{ Para orígenes (renglones),}$$

$$T_{ij} = \tau_j t_{ij} \text{ Para destinos (columnas).}$$

- c. Factor de crecimiento con doble restricción (doblemente acotado). Este modelo se usa cuando, se tiene información sobre el número de viajes generados y atraídos en cada zona de estudio. En consecuencia, se tienen dos conjuntos de factores de crecimiento para cada zona, esto es: τ_i, Γ_j . El usar un factor de crecimiento promedio $F_{ij} = 0.5(\tau_i + \Gamma_j)$, es un supuesto pobre, ya que ninguna de las restricciones $\sum(O_i, D_j)$ será satisfecha. El método de solución se debe a Furness (1965), que usa los llamados factores de balanceo, A_i y B_j como sigue:

$$T_{ij} = t_{ij} \tau_i \Gamma_j A_i B_j$$

Incorporando razones de crecimiento a_i y b_j , dentro de nuevas variables, esto es:

$$T_{ij} = t_{ij} a_i b_j \text{ Con } a_i = \tau_i A_i \text{ y } b_j = \Gamma_j B_j$$

Los factores a_i y b_j ó A_i y B_j deben ser estimados, tal que las restricciones:

$$\sum_j T_{ij} = O_i \text{ y } \sum_i T_{ij} = D_j \text{ sean satisfechas (para aproximar la solución).}$$

Para aproximar la solución Furness propone lo siguiente:

1. Hacer todos los $b_j = 1$ y resolver para a_i ; "resolver para a_i " significa encontrar factores de corrección a_i , que satisfacen la restricción de generación de viajes.
2. Con las anteriores a_i , resolver para b_j ; o sea satisfacer la restricción de atracción de viajes.
3. Guardando los b'_j que se han fijado, resolver para a_i y repetir las etapas 2 y 3, hasta que los cambios sean suficientemente pequeños.



b. Modelo de Gravedad

Estos modelos son una analogía de la ley de gravedad de Newton, y se utiliza para estimar viajes para cada celda de la matriz, sin usar directamente el patrón de viajes observados, por lo que también son llamados modelos sintéticos, como opuestos a los modelos de factor de crecimiento. La formulación más simple del modelo tiene la siguiente fórmula:

$$T_{ij} = \frac{\alpha P_i P_j}{d_{ij}^2}$$

Donde: P_i ; Es la población origen, d_{ij} : distancia entre la zona i y la zona j , P_j : es la población destino, α , factor de proporción. Algunas mejoras se introdujeron al método, por ejemplo:

1. Usar los viajes totales O_i y D_j en lugar de las poblaciones.
2. Un parámetro para calibrar la potencia de .
3. Una función decreciente de la distancia o costo de viaje entre las zonas, al considerar que los efectos de la distancia o “separación”, pueden ser modelados por ésta.

La formulación actual es:

$$T_{ij} = \alpha O_i D_j f(C_{ij})$$

Donde:

O_i , es el número total de viajes generados por la zona i ,

D_j , es el total de viajes atraídos por la zona j ,

α , el factor de proporción, y quizá la más importante: $f(C_{ij})$, es una función de disuasión, y se utiliza para representar incentivo para viajar (o no), cuando se incrementa el costo (en dinero o en tiempo).

Algunas funciones típicas de f , están dadas por las expresiones siguientes:

$f(C_{ij}) = e^{(-\beta C_{ij})}$, que corresponde a la función exponencial.

$f(C_{ij}) = C_{ij}^{-n}$, Función potencia.

$f(C_{ij}) = C_{ij}^n e^{(-\beta C_{ij})}$, Función combinada.



La necesidad de garantizar en los modelos de distribución, las condiciones en las que la suma total de viajes con destino j y la de los que tienen origen i , hace que, se le remplace el parámetro α por dos factores de balanceo: A_i y B_j , tal como en el modelo de factor de crecimiento, entonces se obtiene:

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j f(C_{ij})$$

Ó también:

$$T_{ij} = a_i b_j f(C_{ij}),$$

En donde:

$$a_i = A_i O_i \text{ y } b_j = B_j D_j$$

De esta manera se dice de las expresiones anteriores "*Modelo Clásico de Gravedad Doblemente Restringido*". El método de solución es un proceso iterativo (utilizando el método de Furness), con un conjunto de valores dados para la función $f(C_{ij})$, y se debe iniciar con todos los valores de $b_j=1$ y resolver para A_i , entonces usar estos valores para estimar los B_j , y repetir el proceso hasta lograr convergencia entre a_i y b_j .

Para calibrar el factor β Básicamente existen dos métodos: El algoritmo que propone Hyman (1969) y el modelo triproporcional del algoritmo de Furness.

En el caso del método de Hyman el cálculo de β es como se sigue:

- Proponer una β_0 con la que se desarrollara el método gravitacional para una matriz de costos de viaje dada. El valor inicial se estimara utilizando la siguiente expresión, en la cual c^* corresponde al valor promedio de la matriz de costos, es decir:

$$\beta_0 = \frac{1}{c^*}$$

En donde:

$$c^* = \frac{\sum T_{ij}}{N}$$

- Correr el modelo gravitacional para determinar la matriz de viajes expandida, esto supone que se aplicará el algoritmo de Furness, hasta obtener diferencias despreciables en relación a: a_i y b_j .



- c. Con la matriz de viajes, estimar un nuevo valor promedio en la nueva matriz de costos modelizada. Esta última matriz, puede obtenerse si a cada elemento de la matriz de viajes (obtenida con el método de Furness) se le aplica un proceso inverso al que se usó en el modelo gravitacional para obtener la matriz base, para ello:
- i. Se divide cada elemento de la matriz, entre la relación siguiente, misma que se utilizo en la primera etapa del método gravitacional, para expandir la matriz de costos, (elevada a la $-\beta c_{ij}$) a matriz de viajes.

$$\frac{T_{ij}}{\sum c_{ij}^{(-\beta c_{ij})}}$$

- ii. Se obtiene una matriz del logaritmo natural, al obtener el \ln de cada elemento de la matriz anterior.
 - iii. Finalmente se divide cada elemento de la matriz entre el exponente utilizado en esa iteración para el método gravitacional, β_{m-1} .
- d. Con la nueva matriz de costos, la modelizada, se comparan los valores de c^* y c_m , si los valores promedio fueran muy cercanos el proceso se detiene, en caso contrario, el proceso continua hasta obtener valores cercanos.

En cada iteración es posible utilizar “ m ” como contabilizador, con lo que en la primera corrida del método gravitacional, se obtendrá un β_0 , y $c^*=c_0$. En tanto que en iteraciones posteriores se calculará c_m , y se comparará con c^* , El valor de β , en cada iteración se obtiene con la expresión:

$$\beta_m = \frac{(\beta_{m-1})(c_{m-1})}{c_m}$$

- e. Finalmente es posible aproximar un poco más, si se utiliza la expresión mostrada, hasta obtener valores de β muy parecidos:

$$\beta_{m-1} = \frac{(c^* - c_{m-1})\beta_m - (c^* - c_m)\beta_{m-1}}{(c^* - c_{m-1})}$$

Para evitar confusiones, es posible cambiar el contador m , o simplemente comenzar nuevamente el conteo desde aquí, en esta parte de proceso m vuelve a cero y se utiliza la ultima c obtenida en el paso d , de este algoritmo.



1.1.3 Selección modal.

La selección de modal es el paso final del proceso de proyección de la demanda por transporte, y precede al proceso de modelación de redes. Su objetivo es estimar los flujos de cargas o pasajeros entre las parejas de zonas de tráfico para cada modo de transporte disponible. Una vez que se conoce la demanda, representada en las matrices de flujos por modo de transporte, se integra con la oferta, a través cargar de la red multimodal de transporte. Así se obtiene el modelo de transporte completo

Para estimar los modelos de selección modal, se utiliza la información sobre la distribución y características de la demanda y oferta de una región particular. Las matrices de distribución, son divididas en matrices por modo, por ejemplo: para un par de origen-destino existen los modos siguientes: microbús, metro, trolebús, etc. Por lo tanto el viajero deberá elegir de entre una gama de posibilidades que satisfagan sus necesidades, expectativas y alcances. Teóricamente, la selección del modo de transporte depende de tres conjuntos de características:

- a) Atributos del desplazamiento.
- b) Atributos del usuario.
- c) Atributos del sistema de transporte.

Los atributos más importantes pueden variar, dependiendo si los flujos analizados son de mercancías o de pasajeros. Los atributos del desplazamiento se refieren a las características del viaje según:

- a.1) Motivo del viaje.
- a.2) Destino en la región central.
- a.3) Período cuando el viaje es hecho.
- a.4) Frecuencia de los viajes.
- a.5) Distancia del viaje.

Con respecto a los atributos de los usuarios, algunos de los más importantes son los descritos a continuación:

- b.1) Tipo de automóviles.
- b.2) Ingreso familiar o individual.
- b.3) Nivel cultural.
- b.4) Estructura familiar.

Las características de la oferta de transporte disponible, pueden ser clasificadas en cuantitativas y cualitativas. Entre las cualitativas, se pueden todavía diferenciar atributos con distintos grados de dificultad de medición. Para ilustrar, se pueden señalar las variables a continuación:



- c.1) Costo del viaje.
- c.2) Tiempo de viaje en el vehículo.
- c.3) Tiempo de espera.
- c.4) Confort y conveniencia.
- c.5) Seguridad.
- c.6) Regularidad y confiabilidad.
- c.7) Accesibilidad.

La inclusión de estos factores en la elaboración de los modelos de selección modal está restringida por el tipo, cantidad y calidad de la información disponible para la calibración. Quizá el elemento más restrictivo sea la necesidad de elaborar proyecciones coherentes de las variables, tarea esencial cuando los modelos son utilizados para estimar la demanda futura por transportes. Este hecho reduce significativamente el conjunto de las variables que pueden considerarse en la especificación de los modelos. La selección de los factores que deben de incluirse y excluirse de la formulación, exige sensibilidad por parte del responsable que hace el modelo así como la comprensión de la importancia del fenómeno estudiado.

Modelos Logit.

El modelo logit es usado para relacionar una variable dependiente y , y una o más variables independientes x . La variable dependiente, es discreta y representa una alternativa o categoría, de un conjunto mutuamente exclusivo de alternativas. En tanto que las variables independientes afectan de alguna forma dicha alternativa, además que representar un peso en la elección de la alternativa. Las suposiciones sobre las que descansa la valides del modelo son las siguientes:

1. Las observaciones de la variable dependiente y , son aleatorias, muestreados de la población de interés (aún para muestras estratificadas o muestras basadas en selección).
2. La variable y está asociada a las variables x_i , estas a su vez, son determinadas por influencias, de fuera del modelo.
3. Existe incertidumbre en la relación entre la variable dependiente y las variables x_i , reflejada por un dispersión de las observaciones, alrededor de la relación funcional.
4. La distribución de los términos del error deben ser valorada, para determinar si la selección del modelo es apropiada.

El modelo está formulado de tal forma que permite la introducción de los datos a partir de la estructura siguiente:

1. La variable discreta “ y ” es la selección observada (un modo de transporte seleccionado).
2. Para datos agrupados donde las selecciones observadas de unidades experimentales homogéneas, u observaciones múltiples de un solo experimento, la variable dependiente es una proporción de las selecciones observadas.



3. Una o más variables continuas y/o discretas x , que describen los atributos de la selección o evento, y/o los atributos del propósito de la selección; son causales o influyen en la decisión o proceso de clasificación.

Siguiendo esta misma estructura, las salidas del modelo son las siguientes:

1. Una función $y=f(x)$, de la relación entre las variables dependientes y el grupo de variables independientes.
2. Cierta grado de confianza en las predicciones de futuras, así como en y otras observaciones asociadas a $y=f(x)$.

a. Modelo Logit Binario

Una de las premisas principales sobre la probabilidad, es acerca de la toma de decisiones en relación a un par de opciones: en el caso de una persona que detenta una gama de posibilidades que lo acercan, por ejemplo a su lugar de trabajo. En primer lugar, la persona deberá elegir si realiza el viaje o no, en cuyo caso el problema termina. Este tipo de elecciones pueden modelarse de manera bi-opcional, en cuyo caso se aplicará el modelo logit binario. Este modelo se deduce a partir de los conceptos de máxima entropía (recordamos que el contexto de sistema la entropía se refiere a la capacidad de un sistema para asimilar la evolución del sistema mismo). Este concepto se aplica para generar modelos de distribución y selección modal simultáneos.

$$Max. \ln W \{ T_{ij}^k \} = - \sum_{ijk} (T_{ij}^k \ln T_{ij}^k - T_{ij}^k)$$

Sujeto a.

$$\sum_{jk} T_{ij}^k - O_i = 0$$

$$\sum_{ik} T_{ij}^k - D_j = 0$$

$$\sum_{ik} T_{ij}^k C_{ij}^k - C = 0$$

En donde k: denota el modo de transporte bajo el análisis. La solución al problema es:

$$T_{ij}^k = A_i O_i B_j D_j e^{(-\beta C_{ij}^k)}$$

$$P_{ij}^k = \frac{T_{ij}^k}{T_{ij}} = \frac{e^{(-\beta C_{ij}^k)}}{e^{(-\beta C_{ij}^1)} + e^{(-\beta C_{ij}^2)}}$$



Esta última expresión es conocida como Modelo Logit, en la que:

P_{ij}^k : Proporción (probabilidad de realizar) de viajes de i a j por el modo k .

β : Parámetro de dispersión a calibrar.

C_{ij}^k : Costo, tiempo o distancia de viaje; de i a j , por el modo de transporte k .

Una curva parecida a la mostrada en la figura 1.3, traza con los resultados, la cual coincide con las obtenidas mediante modelos empíricos.

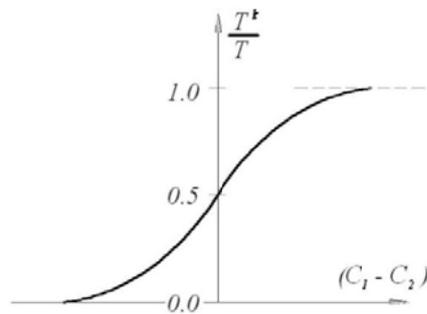


Figura 1.3

En esta grafica se observa la variación de la proporción de viajes (modo k y total de viajes) en relación con la diferencia de costos por modo, En donde:

- Si $C_1 = C_2$, entonces la proporción de viajes es del 50% para cada modo.
- Si $C_1 \ll C_2$, la proporción tiende a 1.0, lo cual indica que C_2 , tiende a dominar las preferencias que representa ese modo.

El parámetro β , busca la normalización de los datos, y se estima a partir de los mismos medios estadísticos, o heurísticos. En este trabajo se da prioridad al método estadístico, específicamente la obtención de β , se lleva a cabo mediante regresión lineal simple tal como se sigue a continuación.

Para empezar supondremos que β , es un parámetro insuficiente para sensibilizar el modelo en relación a la expresión siguiente, ya descrita con anterioridad.

$$C_{ij}^k = a_1 t_{ij}^v + a_2 t_{ij}^w + a_3 t_{ij}^t + a_4 t_{nij} + a_5 F_{ij} + a_5 \emptyset_j + \delta$$



Este polinomio, tiene un conjunto de coeficientes a_i , el cual representa el peso (o parte proporcional), que cada elemento del costo final: C_{ij}^k . Por otra parte, el factor δ , representa una penalidad asociada al modo en cuestión. Si se agrupan los coeficientes entorno a un parámetro auxiliar " λ " entonces es posible realizar la regresión en cuestión. Previo a ello la ecuación del modelo logit binario puede ser reescrita de la siguiente manera, (en la práctica ambas ecuaciones generan resultados muy próximos si se balancea apropiadamente los pesos de β , λ y δ):

$$P_1 = \frac{1}{1 + e^{-\lambda(C_2 - C_1 + \delta)}}$$

Y en consecuencia: $P_2 = 1 - P_1$. Al obtener la relación de porcentajes entre probabilidades de selección se concluye que:

$$\log\left(\frac{P_1}{1 - P_1}\right) = \lambda(C_2 - C_1) + \lambda\delta$$

Función de la que fácilmente puede observarse que cuenta con la estructura $y = mx + b$, además de que se cuenta precisamente con un conjunto de datos $\{C_{ij}\}$ o matriz de costo por pares (origen y destino), mismas que se utilizaran en el proceso de ajuste de la función. En la figura 1.4 se muestra la gráfica de la función típica obtenida a partir de este método.

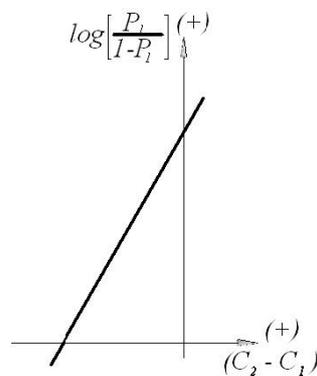


Figura 1.4. Función de ajuste.

En la grafica el termino $\lambda\delta$, es la ordenada de origen, λ , es la pendiente algebraica de la función, en tanto que ésta crece a medida que la diferencia de costos es más significativa.



B. Modelos logit multinomial y logit condicional.

Una generalización del modelo logit binario, es la de evaluar la selección de entre un grupo de tres o más alternativas, en este caso, la expresión utilizada para el cálculo de esta probabilidad, es la siguiente:

$$P_{ij}^1 = \frac{e^{(-\beta C_{ij}^1)}}{\sum_k e^{(-\beta C_{ij}^k)}}$$

Donde: P_{ij}^1 : es la proporción de viajes de i a j por el modo 1.

β : es un parámetro de dispersión a calibrar.

C_{ij}^k : es costo, tiempo o distancia de viaje; de i a j , por el modo de transporte k .

En la práctica resulta más eficiente separar los datos según el tipo de los mismos, esto con el fin de establecer una buena calibración de β . En tal caso, el modelo logit multinomial se expresa de la siguiente forma:

$$P_{ij} = \frac{e^{(-\beta x_i)}}{1 - \sum_k e^{(-\beta x_k)}}$$

En la que la variable x , representa el costo asociado a las características del viajero. Cuando se tienen costos asociados a características del modo de transporte se utiliza la expresión:

$$P_{ij} = \frac{e^{(-\beta z_{ij}^1)}}{\sum_j e^{(-\beta z_{ij}^k)}}$$

Los datos que normalmente se analizan por el modelador, generalmente no contienen mezcla de los atributos específicos del modo de viaje o alternativa y del viajero, lo cual sería muy costoso, por lo que se hace necesario analizar los dos tipos de datos en forma separada, y considerar aspectos del modelo que son específicos para cada uno de ellos. z_{ij} : son los atributos del modo o alternativa. Por ejemplo: tiempo de viaje, costo del pasaje, tiempo de caminar, costo de estacionamiento, tiempo en el vehículo, tiempo de espera, etc.



Si bien el modelo es muy similar al logit multinomial, es necesario tener más cuidado en la interpretación de los parámetros.

Para realizar la estimación de los parámetros de estos modelos, se utiliza el método de Berkson (1953), el que se aplica cuando se trabaja con datos u observaciones repetidas, para cada valor del vector de variables explicativas.

En un principio, se requiere considerar la selección de dos alternativas, de esta forma se tiene que: Sea $i = 1, 2, 3 \dots I$, los niveles (Z^i, S^i) del vector de variables explicativas. Sea R_i el número de observaciones en el nivel i , (intervalo). Sea r_i el número de veces (repeticiones) que la alternativa 1 es seleccionada en el nivel i . Entonces r_i se distribuye en forma binomial con:

$$E\left(\frac{r_i}{R_i}\right) = P_{1i}$$

Por otra parte, sea g la inversa de la función G , para la función logística:

$$G(V) = \frac{1}{1 + e^{-U}},$$

Cuya inversa está dada por:

$$g(P) = \log\left(\frac{P}{1-P}\right),$$

Para ver esto se debe resolver la función:

$$G(V) = P = \frac{1}{1 + e^{-U}},$$

Para V . Entonces considerar la segunda igualdad de la función anterior y multiplicarla por $1 - e^{-U}$, con lo que se tiene:

$$\left[P = \frac{1}{1 + e^{-U}} \right] (1 - e^{-U})$$

Lo que implica que:



$$P(1 - e^{-U}) = \frac{1 - e^{-U}}{1 + e^{-U}},$$

De donde se deduce que $P + Pe^{-U} = 1$, despejando e^{-U} , se tiene:

$$1 - P = Pe^{-U} \Rightarrow e^{-U} = \frac{1 - P}{P}$$

Tomando logaritmo en ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$\log\left(\frac{1 - P}{P}\right) = -V, \text{ expresión que resulta en: } V = \log\left(\frac{P}{1 - P}\right) = g(P)$$

Finalmente para la aplicación de estos modelos, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. Identificar el conjunto C de alternativas para su selección. Estas pueden ser diferentes dependiendo de la localización geográfica, población, características socioeconómicas, atributos de las alternativas y factores que influyen el contexto de la selección.
2. Identificar el subconjunto factible C_n para viajeros de la muestra. Nótese que existen dos conjunto selección, uno para la población completa C , y otro para los individuos seleccionados en la muestra. Es importante que en los conjuntos selección estén representados todos los modos, y no se incluyan modos que no están considerados.

En la práctica puede ser difícil hacer estimación con conjuntos selección restringidos, sin embargo, el modelo resultante puede ser mejorado si las restricciones del conjunto solución, son conocidas por los viajeros.

3. Identificar variables y características. El analista debe identificar cuáles variables influyen en el proceso de decisión, qué características de los viajeros son importantes en el proceso de selección y cómo realizar sus mediciones.
4. Diseñar y administrar una serie de instrumentos (incluyendo dispositivos y esquemas de muestreo), necesarios para recolectar información o para observaciones/registrar la selección hecha por los viajeros.
5. Finalmente, los modelos logit múltiple son estimados y redefinidos para seleccionar "lo mejor", usando todos los datos obtenidos en las etapas previas.

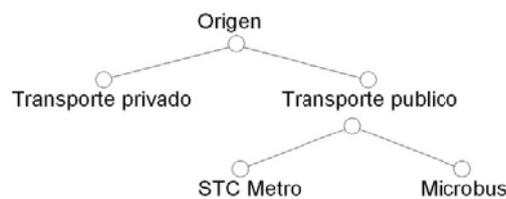


c. Modelo Logit Jerárquico

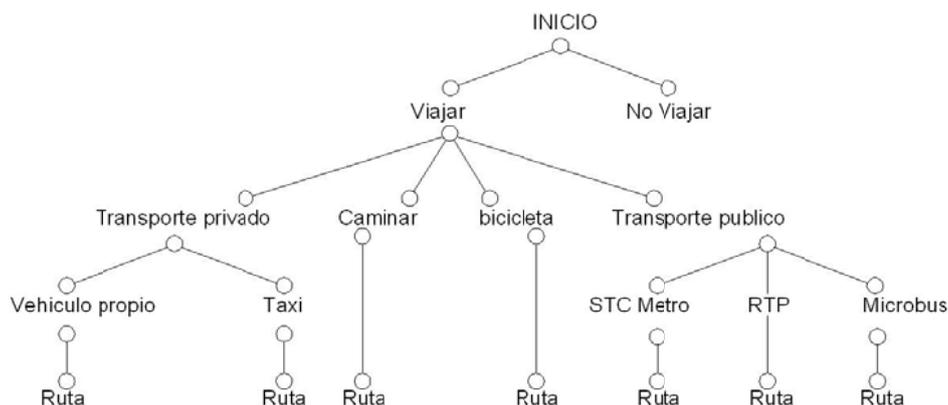
Una de las hipótesis que conduce a la formulación del modelo logit multinomial, es la de que las variables aleatorias, asociadas a cada alternativa, son independientes entre sí. Cuando un subconjunto de alternativas presenta mayor similitud (por ejemplo, modos de transporte público frente al automóvil) esta hipótesis pierde su validez. En estos casos algunas de las propiedades del logit multinomial empiezan a considerarse como problemas.

Para manejar situaciones como ésta, hay una formulación más genérica llamada modelo *logit jerárquico* o *anidado*. Su estructura se caracteriza por agrupar los subconjuntos de alternativas correlacionadas (o más semejantes) en un nivel jerárquico o nido. Por ejemplo, modos de transporte público como el ómnibus y el metro pueden constituir un nido.

Cada nido, en su caso, está representado por un "*modo compuesto*", o *súper-modo*, que compite con los demás modos en un mismo nivel jerárquico. Retomando el ejemplo anterior, el *súper-modo "transporte público"* (compuesto por microbús y metro) compite con el automóvil. El siguiente diagrama presenta la estructura de decisión, semejante a un árbol invertido, adoptada para representar el ejemplo anterior.



Si se desea ampliar más el diagrama puede tener la estructura siguiente:



Una ventaja del modelo logit jerárquico, es la posibilidad de calibrarlo usando la forma desarrollada para el modelo logit múltiple, en donde se procede de la siguiente forma:



1. Primero se estima un modelo logit múltiple para las alternativas (modos), por ejemplo metro y tranvía, omitiendo todas las variables (W) que tengan el mismo valor, para este subconjunto de alternativas. Estas variables se reintegran posteriormente en la jerarquía superior, ya que afectan las elecciones de las alternativas de los nidos o jerarquías superiores.
2. La introducción del nido inferior a la jerarquía superior, se hace a través de la alternativa compuesta, a la que se asocia una utilidad representativa de los nidos, la cual tiene dos componentes:
 - a).- El valor esperado de la utilidad máxima entre alternativas del nido o jerarquía (EMU), considerada como variable.
 - b).- El vector de atributos comunes (W) a todas las alternativas del nido o jerarquía.

$$EMU = \ln \sum \exp(U_j),$$

Donde, U_j = utilidad de la alternativa A_j del nido, exceptuando a las variables que toman el mismo valor. Entonces la utilidad compuesta del nido o jerarquía, estará dada como:

$$U_i = \beta (EMU) + \alpha W$$

Donde α y β son los parámetros a estimar.

3. Hecho lo anterior, en el nivel jerárquico superior se debe estimar otro modelo logit múltiple (o binario), que debe incluir la alternativa compuesta y las demás alternativas no contenidas en el nido o jerarquía inferior.
4. la probabilidad de que un viajero seleccione la alternativa A_j , estará dada por la probabilidad marginal de elegir la alternativa compuesta (en la jerarquía superior) y la probabilidad condicional de que elija la alternativa A_j , en la jerarquía inferior, dado que se seleccionó la alternativa compuesta.

1.1.4 Asignación de tránsito.

La asignación es un proceso que permite la estimación del volumen de viajes en cada componente individual del sistema de transporte. Este proceso es comúnmente conocido como "carga" de la demanda a la red. En éste, al igual que en los procesos anteriormente descritos, es posible simular volúmenes de tránsito del sistema existente, y así pronosticar volúmenes en sistemas alternativos o futuros. La información necesaria para este proceso, se limita a los datos de la red vial y de transporte público, además de los pronósticos del número de viajes origen-destino (estimados mediante modelos de generación). A partir de éstos, puede obtenerse, el volumen esperado de automóviles y pasajeros, en cada ruta o modalidad de transporte. Para dar claridad al tema, primero definiremos algunos conceptos sobre redes de transporte. Más adelante, en el capítulo 1.4 de la página 45 ampliaremos la información necesaria en este tema.

1.2 Función de desempeño de una vialidad.



La selección de ruta es un problema de equilibrio, debido a la decisión de los viajeros por elegir una ruta, es función de los tiempos de viaje. En muchos casos, la selección de un viajero está determinada por el flujo de tránsito en la red, el cual es por sí mismo, un producto de las decisiones de selección de la ruta. Esta interrelación entre las decisiones de selección y el flujo, son la base de la teoría de selección de ruta como modelos de desarrollo.

El modelado comienza con la consideración de la relación entre las decisiones de selección y el flujo. Esta relación, es conocida como función de desempeño de la vía (vial, férrea, etc.). La forma más simple de esta función es directamente proporcional, con la forma clásica de una recta $t = vx + t_0$, en esta función el tiempo de viaje se incrementa en forma lineal con el flujo en la vialidad.

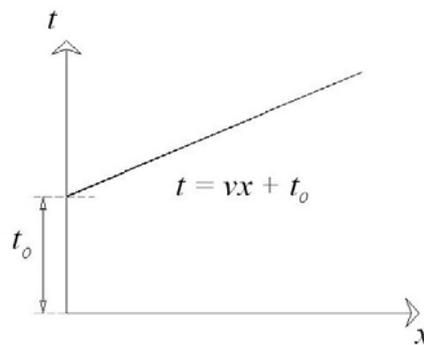


Figura 1.5, Función de desempeño lineal.

En la grafica, se representa la función del tiempo de desplazamiento de una vía. En ella t_0 , es el tiempo total del recorrido, suponiendo que no existe impedancia o resistencia al flujo, para lo cual, generalmente se requiere que la vialidad esté libre de obstrucciones y que el vehículo pueda alcanzar la velocidad de proyecto de la vía. Una función adicional, de este mismo tipo es la representada por una parábola, en la grafica siguiente.

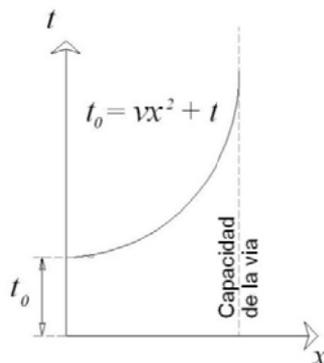


Figura 1.6, Función de desempeño con impedancia cuadrática. Se observa que el tiempo (costo) crece en mayor proporción a medida que la función tiende al límite en la capacidad de la vía.



Si se trazara ambas "curvas" en una misma grafica, es posible determinar el equilibrio intermodal entre uno o varios modos de transporte. Supongamos que la recta de la gráfica anterior representa la función de transporte en un modo a , en tanto que la parábola en un modo b , tal como lo muestra la gráfica siguiente.

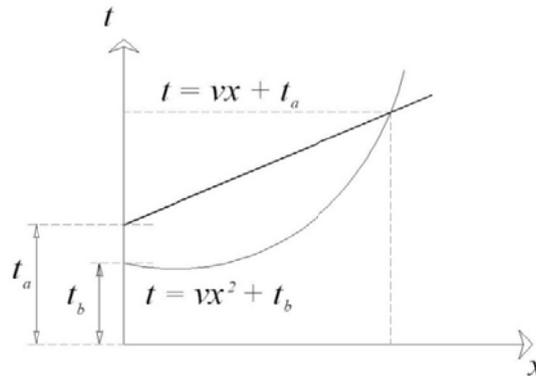


Figura 1.7 análisis del equilibrio de las curvas de desempeño.

Fácilmente se observa que existe un punto de equilibrio "Pe", en el cual el tiempo de recorrido es el mismo para ambos modos, no obstante que con vía libre, el tiempo de recorrido del modo b , es menor que el de la vía a . Este fenómeno, es debido a la diferencia de los atributos observados en ambos modos son diferentes. Es común representar el equilibrio comparando los modos según muestran las graficas siguientes, en las que además se omite, la variable: tiempo, y se sustituye por costo, el cual también puede estar dado en tiempo.

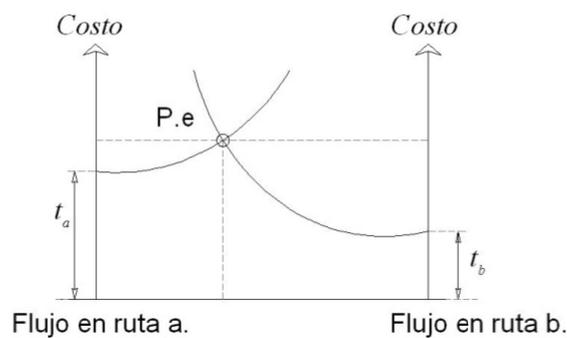


Fig1.8 Función de desempeño en asociada a dos rutas diferente, P.e, representa el punto de equilibrio en ambas, el cual se alcanza cuando los costos son iguales.

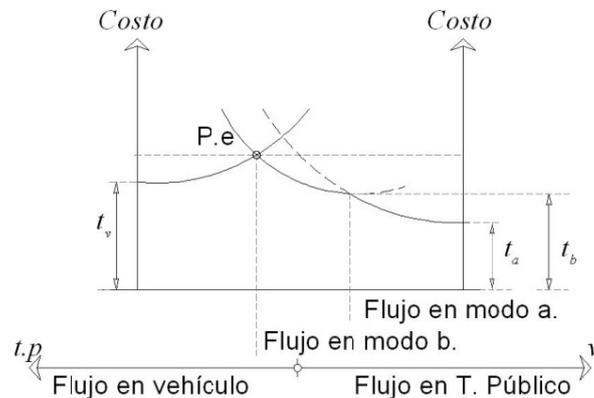


Figura 1.9 Función de desempeño compuesta para dos modos de transporte diferentes..

En la práctica, es común que la evaluación de dos rutas o dos modos de transporte se realice mediante métodos analíticos, para lo cual únicamente se requiere de igualar las funciones de desempeño, y obtener los volúmenes con los que se igualan los tiempos, en tal caso se dice que la red está congestionada. Wardrop (1947), estableció el siguiente postulado:

“En condiciones de congestionamiento, un usuario de la red de transporte no puede minimizar sus costos sin que la red se lo permita.”

Es decir que durante el congestionamiento, sin importar la ruta o selección modal, el costo del traslado es máximo, en todas las rutas y modos. Ello es evidente en las gráficas de la función de desempeño, en donde se observa que las parábolas se intersecan siempre en valores por encima de su costo a vía libre.

En la actualidad existen teorías desarrolladas para la selección de ruta por parte de un viajero, las cuales, hacen dos importantes suposiciones:

1. Considera que el viajero selecciona la ruta entre origen y destino, sobre la base del tiempo de viaje solamente (esto considera la selección de la ruta con el menor tiempo de viaje).
2. Considera que el viajero conoce los tiempos de viaje que pueden ser encontrados en todas las rutas que existen entre su origen y destino. Esta suposición es fuerte, porque el viajero puede no haber viajado sobre todas las rutas existentes entre un origen y destino en particular, y pueden repetidamente (día tras día), seleccionar una ruta basados en su percepción de que las rutas alternativas tienen mayor tiempo de viaje.

Actualmente, la validez de ambas suposiciones está en tela de juicio, debido, en la primera a que existen otras consideraciones que puede tener presente el viajero al realizar su selección. En el caso de la segunda suposición, numerosos estudios han demostrado que la percepción de los viajeros



sobre los tiempos de viaje de las rutas alternativas, es razonablemente cercana a los tiempos de viaje observados.

Se dice que existe el equilibrio del usuario, cuando un viajero de forma individual no puede mejorar su tiempo de viaje de forma unilateral, al cambiar de ruta. En consecuencia el equilibrio del usuario de Wardrop, se puede definir de la siguiente forma:

“El tiempo de viaje entre un origen y destino especificados, sobre todas las rutas disponibles, es el mismo y es menor o igual que, los tiempos de viaje que pueda experimentar un viajero, sobre alguna de las rutas no utilizadas”

Con estas suposiciones la teoría de equilibrio del usuario para la selección de ruta, se puede hacer operacional. La regla de selección, bajo el concepto de equilibrio del usuario, considera que los viajeros seleccionarán una ruta, tal que, minimice su tiempo de viaje personal entre el origen y destino considerados. Los métodos utilizados en este proceso, corresponden a algoritmos de optimización para recorridos mínimos que consideran que uno de los objetivos primordiales de los viajeros, es utilizar la ruta de impedancia mínima entre dos puntos.

Existen tres técnicas cuya aplicación es bastante común:

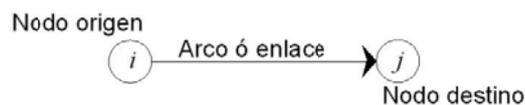
- Trayectorias mínimas,
- Trayectorias mínimas con restricción de capacidad y
- Asignación probabilística.

Esta última, brinda excelentes resultados ya que asigna viajes a trayectorias razonables entre zonas, en función de la impedancia relativa de cada trayectoria.



1.3 Redes de Transporte y redes viales.

La modelación de una red de transporte, está determinada por la teoría de grafos, desarrollada en un principio por el matemático Leonard Euler (1707-1783). En donde se dice que un grafo es un conjunto de nodos (N), y arcos (A) que conectan los nodos y se denota como $G=(N, A)$. Además que el grafo está dirigido si el nodo (i, j) , está conectado de i a j , pero no de j a i . La representación espacial de esta relación está dada por la siguiente expresión.



Generalmente se denotan los nodos mediante números, los arcos mediante los subíndices (i, j) , con la finalidad de indicar los nodos a los cuales converge el arco, así como para denotar el sentido del flujo, en la figura siguiente se muestra un grafo más complejo, debido al número de nodos y sus conexiones (arcos), es posible llamarlo “red”.

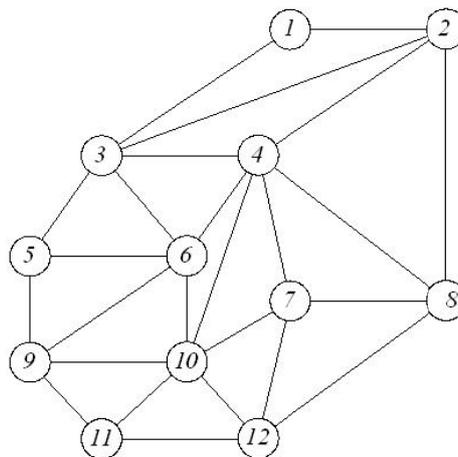


Figura 1.10 Red de nodos y arcos.

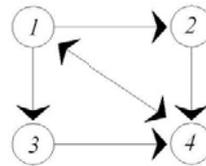
Todas las redes de transporte pueden ser representadas mediante una matriz de vecindades, en la que cada uno de sus elementos a_{ij} , representa un arco, la posición (i, j) del elemento es la conexión con los nodos correspondientes.

$$A = \{a_{ij}\} \begin{cases} 0 & \text{si } i \rightarrow j \text{ no existe enlace} \\ 1 & \text{si } i \rightarrow j \text{ existe enlace} \end{cases}$$



Si a_{ij} , es igual a cero, ese arco no conecta los nodos (i, j) , si el elemento es 1, entonces es un arco conectado y dirigido del nodo i al nodo j . La matriz del siguiente denota a la red mostrada a continuación:

$$A = \begin{bmatrix} \text{Nodo} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Entre las propiedades más relevantes de estas matrices, se sabe que si se eleva la matriz al cuadrado, en la diagonal principal se obtiene el grado de cada nodo (el numero de arcos que convergen), y si finalmente se obtiene la matriz cubica, se revela el numero de rutas de tres pasos que se requieren para ir del nodo origen al nodo destino.

$$A^2 = \begin{bmatrix} \text{Grado} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Elevada al cubo:

$$A^3 = \begin{bmatrix} \text{paso} & 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 1 \\ 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 3 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 1 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

El problema de la modelación, de redes, tiene dos aspectos fundamentales, a saber, el grado de detalle con el que se desea realizar el análisis y el de la asignación de los nodos, ambos aspectos se resuelven si se busca el centroide geográfico de la región delimitada, según el grado de detalle deseado.

Finalmente, se sabe que A esta matriz se le puede agregar más dimensiones para almacenar la impedancia del arco, la velocidad de flujo libre, longitud, capacidad, etc. Datos que resultan básicos para una buena modelación.



1.3.1 Algunos conceptos de redes de transporte:

- **Línea:** Servicio prestado por vehículos de determinada capacidad y frecuencia entre una terminal inicial y una final. Cada vehículo *para* en cada uno de los nodos que definen el recorrido, para permitir que los pasajeros suban o bajen de él; los nodos de la red vial en que no suben ni bajan pasajeros no son incluidos en la descripción de la línea. Cada línea de transporte público ofrece un servicio definido por la secuencia de nodos del recorrido y la frecuencia y capacidad de los vehículos utilizados.
- **Itinerario:** Camino o desplazamiento completo sobre la red de transporte público, efectuado desde la zona de origen hasta una zona de destino. El viaje se describe detalladamente en términos de la secuencia de líneas utilizadas y de los nodos de subida y bajada de cada línea.
- **Ruta de transporte público:** camino que un viajero puede realizar sobre la red de transporte público para desplazarse entre dos nodos de ella. Normalmente utiliza un subconjunto de líneas que unen los nodos extremos, tal que se optimice el tiempo de viaje desde el punto de vista del usuario.
- **Estrategia:** incluye todas las rutas que cumplen la anterior condición, más aquellas combinaciones con transbordo que les compitan.

1.3.2 Rutas Mínimas en Redes de Transporte.

Uno de los problemas importante que debe enfrentar un analista de sistemas de transporte es el de la simulación del comportamiento de los viajeros frente a la elección de rutas en la red. Aunque el tipo de algoritmo formulado para resolver este problema depende de las suposiciones que se hagan sobre las funciones de costo (o tiempo, o distancia o combinación de ellos) de transporte sobre los arcos de la red, el cálculo de rutas mínimas constituye una etapa fundamental de gran parte de ellos.

Si se hace la hipótesis de que los costos en los arcos son independientes del flujo que pasa a través de ellos, resulta razonable suponer que todos los viajeros que se desplazan entre dos nodos determinados usan la ruta de costo mínimo. Si por el contrario, se supone que los costos de transporte en un arco aumentan a medida que aumenta el flujo, es más adecuado suponer que el flujo entre dos nodos se repartirá entre varias rutas alternativas.

Como se verá en las secciones siguientes existen modelos de equilibrio que permiten determinar los flujos entre rutas alternativas para un mismo par de nodos. En este caso el cálculo de rutas mínimas aparece como un sub-problema de un problema más complejo.

Existe un gran número de algoritmos, para resolver el problema de cálculo de rutas mínimas, sin embargo, todos ellos pueden ser vistos como variaciones de otros. A continuación serán descritos dos algoritmos, representativos de los principales tipos existentes.



El primero de ellos, conocido como algoritmo de Dijkstra (1959), determina las rutas mínimas desde un nodo dado (denominado fuente) a todos los nodos restantes de la red. El segundo, conocido como algoritmo de Floyd, permite obtener simultáneamente las rutas mínimas entre todos los pares de nodos de la red. Los dos algoritmos pueden usarse para grafos dirigidos, no dirigidos o mixtos y ambos suponen que todos los costos en los arcos son no negativos.

El algoritmo consiste básicamente en lo siguiente: a partir del nodo fuente se encuentra el nodo más cercano y se incluye el arco que lo une a la fuente del árbol de rutas mínimas. A continuación se procede a determinar sucesivamente el segundo nodo más cercano, el tercer nodo más cercano etc., al árbol de rutas mínimas que se va formando en cada etapa o paso.

Este procedimiento se repite hasta que todos los nodos hayan sido analizados y conectados. Para llevar a cabo este procedimiento se asocia a cada nodo de la red una "etiqueta" que contiene dos atributos $d(j)$, $p(j)$.

En la evolución del algoritmo cada nodo puede encontrarse en uno de los dos estados que siguen:

- a. En estado "abierto", cuando la etiqueta es aún temporal (el nodo no pertenece aún al árbol de rutas mínimas en formación).
- b. En estado "cerrado", cuando la etiqueta es permanente (el nodo ha sido incorporado ya al árbol de rutas mínimas).

En una etapa cualquiera del algoritmo, la etiqueta del nodo j contiene lo siguiente:

- a.1) $d(j)$, Longitud o costo de la ruta mínima obtenida hasta ese momento desde el nodo fuente, f , al nodo j .
- a.2) $p(j)$, Nodo inmediatamente anterior a j en la ruta mínima obtenida hasta ese momento entre f y j .

Finalmente, se usará la letra k para denotar el último nodo cuya etiqueta ha sido cerrada y el símbolo "*" para indicar el predecesor del nodo fuente f .



El algoritmo puede ahora describirse como sigue:

Paso 1: Iniciación:

$$\begin{aligned}d(f) &= 0 \\p(f) &= 0\end{aligned}$$

En donde:

$$\left. \begin{aligned}d(j) &= \infty \\p(j) &= 0\end{aligned} \right\} \forall j \neq f$$

- Considerar f como cerrado y todos los demás nodos abiertos.
- $k = f$ (f es el último nodo que ha adquirido el estado cerrado hasta este momento).

Paso 2: Revisar las etiquetas de todos los nodos en estado abierto. Examinar todos los nodos unidos directamente con el nodo k (no considerar aquellos que estén cerrados). Para los que están abiertos:

$$d(j) = \min \{ d(j), d(k) + c(k, j) \}, \text{ Donde } c(k, j) = \text{costo del arco } (k, j)$$

Paso 3: Buscar el nuevo nodo a poner en estado cerrado. Para todos los nodos en estado abierto escoger aquel de menor $d(j)$. Sea éste el nodo i .

Paso 4: Buscar el nodo predecesor de i . Considerar todos los arcos (j, i) que llegan a i desde un nodo en estado cerrado. Encontrar entre éstos el nodo j tal que: $d(i) - c(j, i) = d(j)$:

- Sea este nodo j^* el predecesor de i .
- Haga $p(i) = j^*$.

Paso 5: Cerrar la etiqueta del nodo i .

- Si todos los nodos están cerrados PARAR.
- Si no, haga $k = i$ y vuelva al paso 2.

Algunas Observaciones:

1. Si en el Paso 3 hay empates escoja arbitrariamente el futuro nodo a poner en estado cerrado.



2. El algoritmo puede usarse también para encontrar la ruta mínima entre f y un nodo j dado. Lo que cambia es el Paso 5. En este caso el algoritmo termina cuando el nodo j adquiere el estado cerrado.
3. Este algoritmo, o más exactamente variaciones menores de él, recibe el nombre de algoritmo de Dijkstra.

Una vez terminado el algoritmo, las etiquetas de los nodos permiten obtener las rutas mínimas. Así, la parte $d(j)$ de esta etiqueta indica el costo de viaje entre f y j . La parte $p(j)$ indica el nodo predecesor de j en la ruta. Buscando el predecesor del predecesor se llega eventualmente a f , habiéndose trazado la ruta completa.

A menudo se requiere obtener rutas mínimas entre todos los pares de nodos de una red (tablas de distancias entre pares de ciudades, por ejemplo). Evidentemente esto puede hacerse repitiendo n veces (si n es el número de nodos de la red) el algoritmo de Dijkstra. Sin embargo, un método más eficiente desde el punto de vista del tiempo de cálculo es el de Floyd-Warshall, descrito en 1959 por Bernard Roy.

La descripción del algoritmo es bastante simple. Para comenzar, se numeran los n nodos del grafo $G(N, L)$ (nodo, arco) con enteros positivos $1, 2, \dots, n$. A continuación se definen dos matrices. Una matriz de distancias $D^{(0)}$ y una matriz de nodos predecesores $P^{(0)}$.

$$d_0 = (i,j) = \begin{cases} c(i,j) & \text{si el arco } (i,j) \text{ existe.} \\ \text{ó} & \text{si } i = j \\ \infty & \text{si el arco } (i,j) \text{ no existe} \end{cases}$$

$$P_0(i,j) = \begin{cases} i & \text{si } i \neq j \\ - & \text{si } i = j \end{cases}$$

Definidas estas matrices iniciales, el algoritmo procede en etapas sucesivas suponiendo en la etapa k que para ir de i a j , si pasa por el nodo k . Las etapas del algoritmo son las siguientes:

Paso 1: Hacer $k = 1$.

Paso 2: Obtener los elementos de la matriz $D^{(k)}$ como sigue:

$$d_k(i,j) = \min [d_{k-1}(i,j), d_{k-1}(i,k) + d_{k-1}(k,j)].$$

Paso 3: Obtener los elementos de la matriz $P^{(k)}$ como sigue:



$$P_k(i, j) = \begin{cases} P_{k-1}(i, j) & \text{si } d_k(i, j) = d_{k-1}(i, j) \\ P_{k-1}(k, j) & \text{si } d_k(i, j) \neq d_{k-1}(i, j) \end{cases}$$

Paso 4: Si $k = n$ se detiene, Si $k < n$, haga $k = k + 1$ y vuelva al Paso 2.

Al terminar el algoritmo el costo de la ruta mínima entre i y j , $d(i, j)$, está dado por el elemento $d(i, j)$ de la matriz final $D^{(n)}$. La matriz de nodos predecesores $P^{(n)}$ permite retrasar cada una de las rutas mínimas.

1.3.3 Modelado de la Red.

Conocida la movilidad, actual o futura, y definida la red de transporte que ha de soportarla, se trata de simular el comportamiento de ésta a través de la obtención de las cargas en la red que se deriven de la matriz de movilidad.

Lógicamente existen modelos diferentes de redes de asignación para redes de transporte público y privado, habiendo experimentado un mayor desarrollo los empleados para redes privadas. A partir de la red real, se selecciona un grafo, que garantice todos los posibles itinerarios coherentes entre cada par de centroides. El centroide es la representación, en la red, del origen o el destino de un viaje, en tanto que un viaje entre zonas se convierte en una relación entre centroides.

La modelización de la red supone la descripción de ésta de acuerdo a las características del software que se desea ocupar, en general:

- Nodos extremos del arco.
- Distancia entre nudos.
- Velocidad o tiempo que dura el viaje.
- Tipo de infraestructura.
- Tipo de vía.
- Tipo de área atravesada.

El ajuste de la red consiste en comprobar que los itinerarios que permite establecer la red modelada se corresponden con la realidad, a través de la obtención de las rutas de costo/tiempo/distancia mínimas desde una serie de centroides seleccionados y su comprobación con los realmente seguidos por los usuarios¹.

Los caminos pueden ser:

- De tiempo mínimo t_{ij}

¹ Los caminos vienen dados por la sucesión de áreas que los componen.



- De distancia mínimo d_{ij}
- De costo generalizado mínimo $c_{ij} = a t_{ij} + b d_{ij}$

Al finalizar el proceso de ajuste se tiene una descripción de la red objeto de análisis. Manipulable informáticamente, con base a programas de cálculo de rutas mínimas, de los que se puede obtener la matriz de costo generalizados mínimos, e interzonas a utilizar en los modelos de distribución zonal.

1.4 Modelos de Asignación.

Un modelo de asignación es el algoritmo que indica la demanda de transporte, referida por una matriz de viajes, en la utilización de la red, expresada por el número de viajes que utiliza cada arco de la red, la red en su conjunto. Los modelos más comunes son:

1. Todo o nada.
2. Asignación estocástica a caminos alternativos.

La asignación, todo o nada. En este modelo se asigna la totalidad de viajes en cada relación i, j al camino de tiempo, distancia o costo generalizado mínimo. En redes urbanas, en las que existen entre cada par de zonas caminos alternativos muy similares, en los que en realidad se reparte el tráfico, el modelo todo o nada tiende a sobrecargar ciertos itinerarios y a descargar otros, no ofreciendo buenos resultados.

Una mejora de este sistema de asignación es el método Burrell, que es una asignación todo o nada, en la que se considera que el tiempo de viaje asignado a cada arco es un tiempo medio que los usuarios perciben con una desviación típica, de forma que cuando se construye el camino mínimo se establece el tiempo de viaje a través de un proceso aleatorio, en que el valor medio es el establecido en la red y la desviación típica la que se defina específicamente. Mediante este proceso es posible que los itinerarios entre dos parejas de zonas, que por el camino mínimo tendrían gran parte del itinerario común, tengan caminos diferentes o con parte comunes menores.

En el caso de la **asignación estocástica** a caminos alternativos, se definen entre cada par de zonas dos o más caminos alternativos, repartiéndose el flujo existente en dicha relación entre dichos itinerarios, teniendo en cuenta el tiempo mínimo y el tiempo por cada uno de los itinerarios. Cualquiera de estos métodos no considera la capacidad de las vías, pudiendo asignar mayor tráfico a ciertos arcos, que su capacidad.

➤ **Asignación “todo o nada” (AON):** Todo el tráfico entre un par O-D es asignado a la ruta más corta que los conecta. Este modelo no es realista pues no considera el uso de otra ruta que pueda ser similar. No considera la capacidad de la red. El tiempo de viaje es una entrada fija y no depende del nivel de congestión.



→ **Asignación estocástica:** Distribuye los viajes entre cada par O-D por las rutas alternativas múltiples que los conectan. La proporción de viajes que se asigna a una ruta particular es igual a la probabilidad de selección de esa ruta, la cual se calcula por medio del modelo de selección de ruta “logit”.

En general, una ruta que ofrezca el tiempo mínimo tendrá más probabilidad de ser elegida. La asignación estocástica, no asigna viajes a todas las rutas alternativas, solo a las rutas que tienen enlaces que se consideran “razonables”.

Un enlace razonable es aquel que toma el viajero, tal que le permita viajar desde su origen, hasta su destino en el tiempo mínimo o cerca del mínimo posible. El tiempo de viaje sobre el enlace es una entrada fija y no depende del flujo. En consecuencia, el método no está en equilibrio. No tiene en cuenta la capacidad del enlace.

Para este modelo de asignación estocástica, se usa el algoritmo de STOCH mediante el cual es posible discriminar en la selección de rutas, ya que en problemas reales el poder enumerar todas las rutas posibles entre un nodo origen y un nodo destino, puede resultar muy difícil, si no imposible. Una aproximación práctica para contrarrestar este problema, es restringir las rutas a un “conjunto selección” de las mejores, esto es las que posiblemente conoce y/o considera mejor el viajero, entre algún par de puntos. Ya que es poco probable que conozca la totalidad de ellas. La selección de estas rutas puede requerir de cierto conocimiento del área.

Otra posible aproximación puede ser formular la selección del viajero a nivel de arco, más que a nivel de ruta. Para ese efecto, la utilidad de una ruta (i, j, r) , puede ser formulada en términos de las utilidades de los arcos. Entonces la utilidad de un arco en conexión con un viaje desde un nodo i a un nodo destino j puede ser especificada como:

$$\bar{V}_a = \begin{cases} g_{il} - g_{ik} - g_a + \varepsilon_a & \text{si } g_{il} > g_{ik}, \forall a \in k^- \text{ y } l^+ \\ -\infty & \end{cases}$$

Donde g_{il} es el costo mínimo generalizado desde i , para los arcos que inician en k , y similarmente para l . La diferencia entre los dos primeros términos, se puede interpretar la ganancia que tiene el viajero por usar el arco. El tercer término es el costo generalizado del arco.

De esta forma en particular, la especificación de esta utilidad asegura que solo se usarán arcos “eficientes”, entre un origen i , y un destino j dados. Los arcos (k, l) tales que su nodo final l es el más alejado en términos de su costo generalizado (tiempo de viaje y costo) g_{il} , del nodo origen i , que de su nodo destino l .



1.4.1 Algoritmo de STOCH.

1. Estimar el costo mínimo g_{ik} desde el nodo origen i a todos los otros nodos k , usando el algoritmo de ruta más corta, con el nodo i como raíz, y el costo generalizado de arcos:

$$g_a = c_a + \tau t_a \quad \forall a$$

2. Para cada arco a con nodo de inicio k y nodo final l , estimar h_a como:

$$h_a = \begin{cases} e^{\beta(g_{il} - g_{ik} - g_a)}; & \text{si } g_{il} > g_{ik} \\ 0 & \end{cases}$$

Para $\forall a \in k^-$ y l^+ donde:

g_{il} : Distancia más corta entre el nodo origen i y el nodo l , (diferente al nodo destino j).

g_{ik} : Distancia entre el nodo origen i y el nodo k , anterior a l .

g_a : Distancia original del arco a .

k^+ : indica llegada de arcos al nodo k .

l^- : indica salida de arcos del nodo l .

Etapa iterativa hacia delante:

Iniciar en el origen i y ordenar los nodos en forma creciente en costo g_{ik} desde el origen. Para cada arco a , con nodo de inicio en k y nodo final en l , estimar p_a como:

$$p_a = \begin{cases} h_a; & \text{si } a \in i^- \\ h_a \sum_{b \in k^+} p_b; & \end{cases}$$

$$\forall a \in k^- \text{ y } l^+$$

Donde:

h_a : corresponde al arco que sale del nodo origen i ; $\sum_{b \in k^+} p_b$: Suma de los valores h_a de los arcos, que llegan al nodo k .

El algoritmo termina cuando el destino j sea alcanzado.



Etapa iterativa hacia atrás:

Iniciar en el destino j y en ordenar los nodos en forma decreciente en costo g_{il} desde el origen i determinar el volumen para cada arco a , entre los nodos k y l como:

$$v_a = \left(T_{il} + \sum_{b \in l^-} v_b \right) \frac{p_a}{\sum_{b \in l^+} p_b}; \quad a \in k^- \text{ y } l^+; \quad \forall a$$

Donde T_{il} es el flujo dado del nodo origen i al nodo l .

$\sum_{b \in l^-} v_b$: Suma del volumen de los arcos que salen del nodo l .

$\sum_{b \in l^+} p_b$: Suma de los valores h_a de los arcos, que llegan al nodo l .

Detenerse cuando el origen i sea alcanzado.

Esta es pues la metodología que el presente trabajo pretende aplicar para ofrecen los posibles escenarios: El funcionamiento de la red actual de transporte en la Av. De los Insurgentes, y sus proyecciones de crecimiento para los próximos 10.



”Vivimos en una sociedad profundamente dependiente de la ciencia y la tecnología y en la que nadie sabe nada de estos temas. Ello constituye una fórmula segura para el desastre.”
Carl Sagan (1934-1996).

CAPITULO II. LA AV. INSURGENTES Y SU ENTORNO

2.1 La zona metropolitana del valle de México.

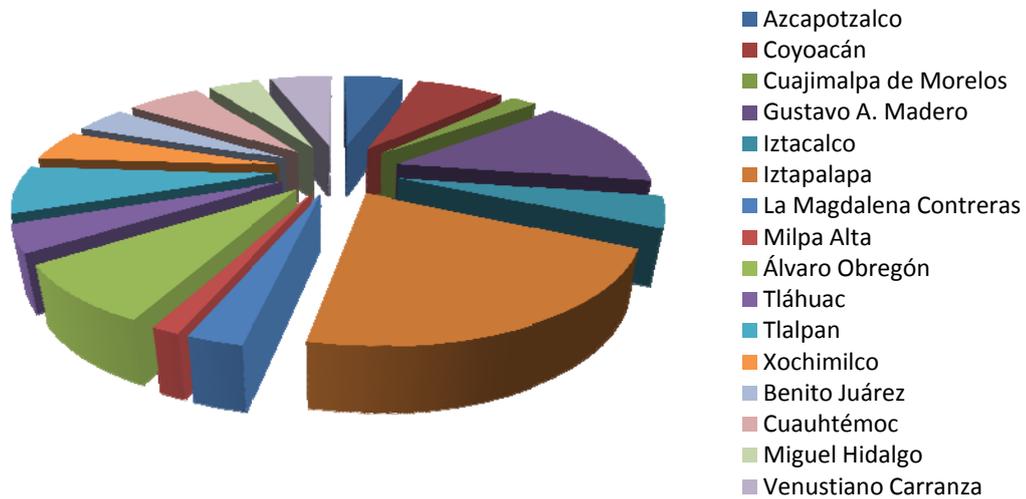
La Zona Metropolitana del Valle de México o ZMVM, está formada por la Ciudad de México y 60 municipios conurbados (uno de ellos del Estado de Hidalgo, los restantes del Estado de México). Según los resultados del censo 2010, esta zona cuenta con una población poco mayor que 20 millones de habitantes. Una estimación de población del mismo año, coloca el área urbana de la zona metropolitana como la novena más poblada del mundo, y una de las más pobladas de Latinoamérica. Se localiza en latitud $19^{\circ} 14' 47.29''$ y longitud $99^{\circ} 06' 04.86''$, el Distrito Federal contribuye a la ZMVM para su formación con $1,479 \text{ km}^2$, en tanto que el Estado de México con 2061 km^2 , en total ocupa un área de 3540 km^2 ; de los cuales 1500 km^2 están completamente urbanizados.



Figura 2.1 Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM).



Según INEGI, para el Distrito Federal la población actual está dividida, según se muestra en la grafica No. 2.1. (Censo de Población y vivienda 2010).



Gráfica No. 2.1, Habitantes del Distrito Federal por delegaciones

Delegación	Total de Habitantes	Extensión territorial	
		Has.	Densidad de población Hab./Ha.
Azcapotzalco	425,298.00	3,366.00	126
Coyoacán	628,063.00	5,440.00	115
Cuajimalpa de Morelos	173,625.00	7,458.00	23
Gustavo A. Madero	1,193,161.00	9,407.00	127
Iztacalco	395,025.00	2,330.00	170
Iztapalapa	1,820,888.00	11,700.00	156
La Magdalena Contreras	228,927.00	7,458.00	31
Milpa Alta	115,895.00	22,841.00	5
Álvaro Obregón	706,567.00	9,617.00	73
Tláhuac	344,106.00	8,534.00	40
Tlalpan	607,545.00	34,007.00	18
Xochimilco	404,458.00	11,800.00	34
Benito Juárez	355,017.00	2,663.00	133
Cuauhtémoc	521,348.00	3,240.00	161
Miguel Hidalgo	353,534.00	4,699.00	75
Venustiano Carranza	447,459.00	3,340.00	134
Distrito Federal	8,720,916.00	147,900.00	



La explosión demográfica que se presentó a finales de 1960 y principios de 1970, trajo consigo la expansión de la mancha urbana. Hacia finales de los 60's, la población del Distrito Federal era cercana a los 4.9 millones de personas, en la actualidad se estima superior a 8.7 millones. La gráfica 2.2 muestra el patrón de crecimiento, descrito más ampliamente por la lista de datos que le sigue.

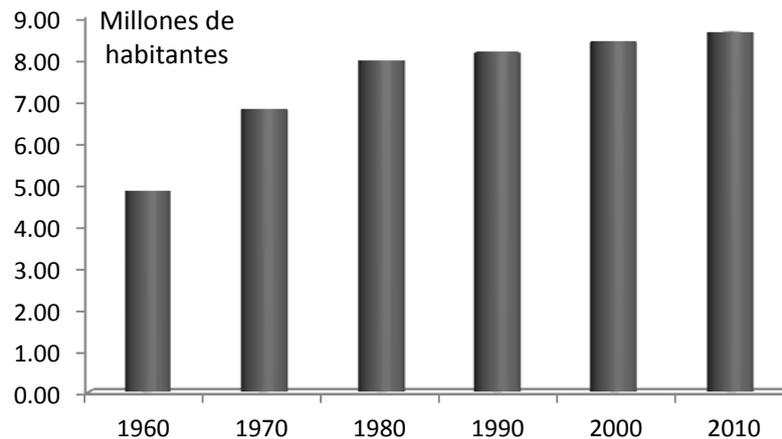


Figura No. 2.2 Gráfica del crecimiento de la población en el Distrito Federal.

Delegación	Población					
	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Azcapotzalco	370,724	534,554	557,427	474,688	455,131	425,298
Coyoacán	169,811	339,446	541,328	640,066	653,489	628,063
Cuajimalpa de Morelos	19,199	36,200	84,665	119,669	136,873	173,625
Gustavo A. Madero	753,966	1,234,376	1,384,431	1,268,068	1,256,913	1,193,161
Iztacalco	198,904	447,331	523,971	448,322	418,892	395,025
Iztapalapa	254,355	522,095	1,149,411	1,490,499	1,696,609	1,820,888
La Magdalena Contreras	40,724	75,429	159,564	195,041	211,898	228,927
Milpa Alta	24,739	33,694	47,417	63,654	81,102	115,895
Álvaro Obregón	220,011	456,709	570,384	642,753	676,930	706,567
Tláhuac	29,880	62,419	133,589	206,700	255,891	344,106
Tlalpan	61,195	130,719	328,800	484,866	552,516	607,545
Xochimilco	70,381	116,493	197,819	271,151	332,314	404,458
Benito Juárez	507,215	576,475	480,741	407,811	369,956	355,017
Cuauhtémoc	956,582	923,182	734,277	595,960	540,382	521,348
Miguel Hidalgo	611,921	605,560	501,334	406,868	364,398	353,534
Venustiano Carranza	581,629	749,483	634,340	519,628	485,623	447,459
Distrito Federal	4,871,236	6,844,165	8,029,498	8,235,744	8,488,917	8,720,916



El crecimiento poblacional del estado de México, dentro de la región, es de igual manera significativo. Para 1970 se consideraban únicamente tres municipios dentro de los planes de desarrollo urbano del distrito federal: Netzahualcóyotl, Naucalpan y Tlalnepantla, aun que este ultimo apenas con 5 mil habitantes. En el mapa siguiente se muestra el ritmo de crecimiento del D. F., por orden delegacional, según el INEGI y el Instituto Nacional de Ecología (INE).

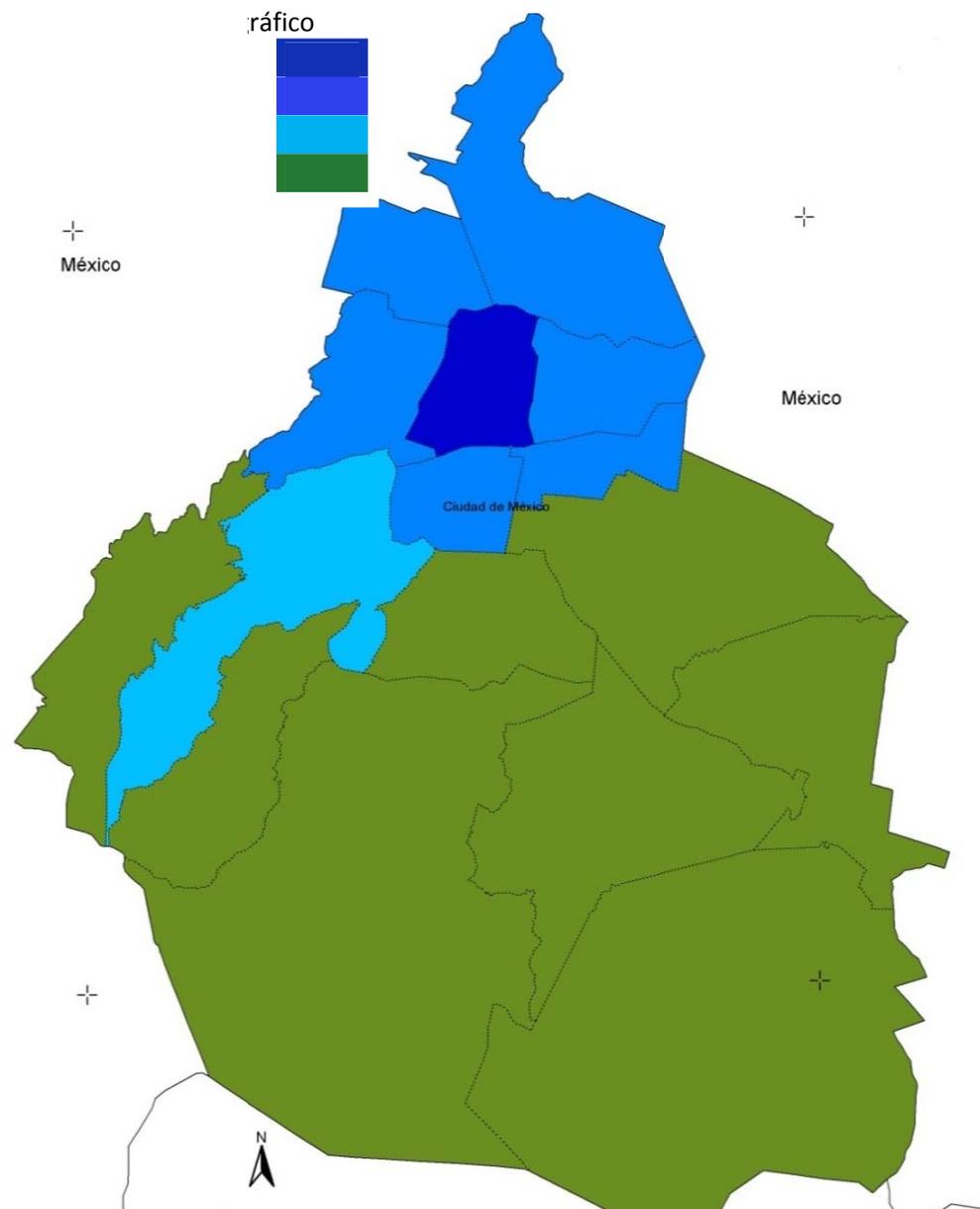


Figura 2.3 Crecimiento poblacional de la ZMVM.



En este entorno, la Avenida de los Insurgentes es la avenida más extensa de la ciudad, tiene una longitud de 28.8 kilómetros y sirve como uno de los principales ejes viales del Distrito Federal, comunicando de norte a sur, desde el Acueducto de Guadalupe en el norte de la ciudad hasta el entronque con el Viaducto Tlálpán. Al norte desemboca en la Autopista México-Pachuca y al sur con la Autopista México-Cuernavaca. Esta avenida cruza las delegaciones Gustavo A. Madero, Cuauhtémoc, Benito Juárez, Álvaro Obregón, Coyoacán y Tlálpán del Distrito Federal. En su sección norte es mayoritariamente de uso habitacional, y después del puente de Nonoalco se transforma en una vialidad eminentemente de servicios, oficinas y comercios, este carácter se va acentuando conforme avanza hacia el sur y es en su tramo entre Viaducto y Copilco donde encuentra su mayor dinamismo comercial, y se convierte en una elegante vía donde convergen lo mismo restaurantes, centros nocturnos, corporativos, bancos, almacenes, supermercados o agencias automotrices, pasado este punto atraviesa el campus Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México abreviado simplemente CU, Tras el cual, nuevamente aparecen comercios y restaurantes hasta llegar a la salida a Cuernavaca.

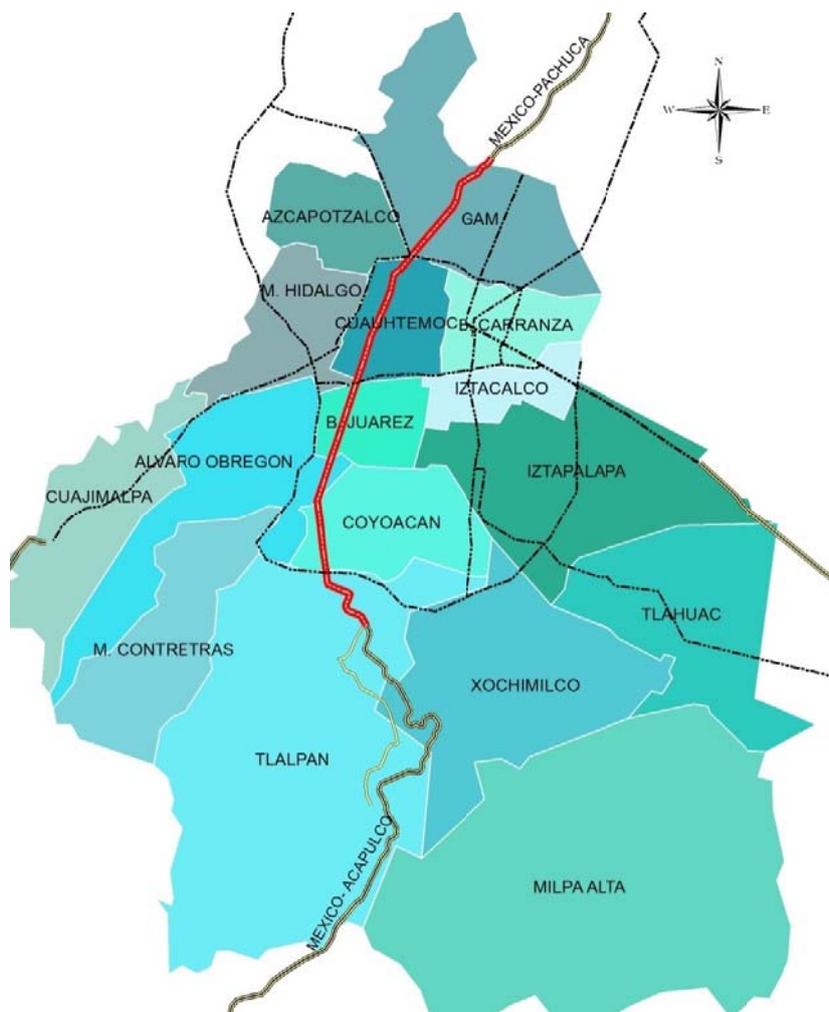


Figura 2.4 ubicación del corredor Insurgentes en el Distrito Federal.



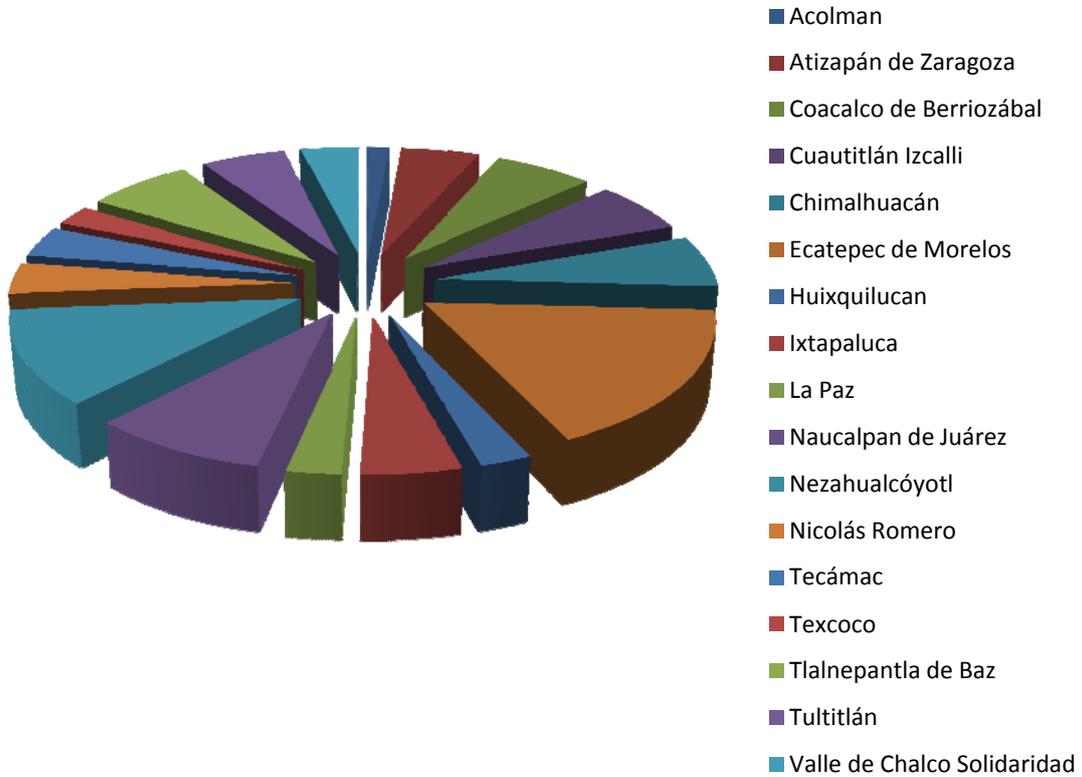
En lo que toca al Estado de México se tienen los siguientes datos, también tomados de INEGI:

Municipio	Habitantes	Extensión territorial	
		Área (Has.)	Densidad de población Hab./Has.
Acolman	136,558	83,950	16.27
Apaxco	27,521	75,730	3.63
Atenco	56,423	83,800	6.73
Atizapán	10,299	6,920	14.88
Atizapán de Zaragoza	489,937	91,070	53.80
Atlautla	27,663	162,060	1.71
Axapusco	25,559	230,940	1.11
Ayapango	8,864	36,410	2.43
Coacalco de Berriozábal	278,064	35,100	79.22
Cocotitlán	12,142	14,860	8.17
Coyotepec	3,903	49,320	0.79
Cuautitlán	140,059	2,632,000	0.53
Cuautitlán Izcalli	511,675	109,540	46.71
Chalco	31,013	219,220	1.41
Chicoloapan	175,053	53,910	32.47
Chiconcuac	22,819	6,820	33.46
Chimalhuacán	614,453	44,690	137.49
Ecatepec de Morelos	1,656,107	160,170	103.40
Ecatzingo	9,369	50,770	1.85
Huehuetoca	100,023	118,020	8.48
Hueypoxtla	39,864	233,910	1.70
Huixquilucan	242,167	140,670	17.22
Isidro Fabela	10,308	75,790	1.36
Ixtapaluca	467,361	327,400	14.27
Ixtlahuaca	141,482	335,850	4.21
Jaltenco	26,328	4,730	55.66
Jilotepec	83,755	583,950	1.43
Jilotzingo	1,797	119,700	0.15
Juchitepec	23,497	140,110	1.68
La Paz	253,845	36,360	69.81
Melchor Ocampo	5,024	17,780	2.83
Naucalpan de Juárez	833,779	156,630	53.23
Nezahualcóyotl	1,110,565	63,740	174.23
Nextlalpan	34,374	54,510	6.31
Nicolás Romero	366,602	235,650	15.56
Nopaltepec	8,895	83,700	1.06



Otumba	34,232	195,560	1.75
Ozumba	27,207	45,640	5.96
Papalotla	4,147	3,590	11.55
San Martín de las Pirámides	24,851	67,220	3.70
Tecámac	364,579	157,340	23.17
Temamatla	11,206	28,750	3.90
Temascalapa	35,987	163,800	2.20
Tenango del Aire	10,578	37,770	2.80
Teoloyucan	63,115	53,040	11.90
Teotihuacán	5,301	83,160	0.64
Tepetlaoxtoc	27,944	178,370	1.57
Tepetlixpa	18,327	42,980	4.26
Tepotzotlán	88,559	187,820	4.72
Tequixquiac	33,907	122,320	2.77
Texcoco	235,151	432,610	5.44
Tezoyuca	35,199	17,460	20.16
Tlalmanalco	4,613	161,570	0.29
Tlalnepantla de Baz	664,225	77,170	86.07
Tonanitla	10,216	8,470	12.06
Tultepec	91,808	27,220	33.73
Tultitlán	524,074	69,150	75.79
Valle de Chalco Solidaridad	357,645	46,530	76.86
Villa del Carbón	44,881	306,560	1.46
Zumpango	159,647	223,950	7.13
Estado de México	10,864,546	9,613,830	

En la gráfica de la siguiente pagina, se muestra la distribución de la población para los municipios con población de más de 100,000 habitantes. Cabe mencionar que en esta tabla se omiten los demás municipios por razones de espacio en la grafica.



Grafica No. 2.5, Gráfica de habitantes de los municipios del Estado de México con mayor densidad de población.



2.2 El Uso de suelo en Distrito Federal.

Según la Ley De Desarrollo Urbano Para Distrito Federal 2006, el suelo, se clasifica de la manera siguiente:

Artículo 32. Los usos del suelo que se determinarán en la zonificación son los siguientes:

I. En suelo urbano:

- a. Habitacional.
- b. Comercial.
- c. Servicios.
- d. Industrial.
- e. Equipamiento e infraestructura.
- f. Espacios abiertos.
- g. Áreas verdes, parques y jardines.

II. En suelo de conservación:

II.1 Para las áreas de rescate ecológico:

- a. Habitacional.
 - i. Servicios.
 - ii. Turístico.
 - iii. Recreación.
 - iv. Forestal.
 - v. Equipamiento e infraestructura.
- b. Para las áreas de preservación ecológica:
 - i. Piscícola.
 - ii. Forestal.
- c. Equipamiento rural e infraestructura. Siempre y cuando no se vulnere y altere la vocación del suelo y su topografía.

Para las áreas de producción rural y agroindustrial:

- i. Agrícola;
- ii. Pecuaria;
- iii. Piscícola;
- iv. Turística;
- v. Forestal;
- vi. Agroindustrial, y
- vii. Equipamiento e infraestructura.

En la siguiente página se muestra el mapa del Distrito Federal, que contiene el uso de suelo, según el Instituto Nacional de Ecología, en el se aprecia, a grandes rasgos la región con mayor necesidad de servicios (entre ellos el de transporte), en el D. F.

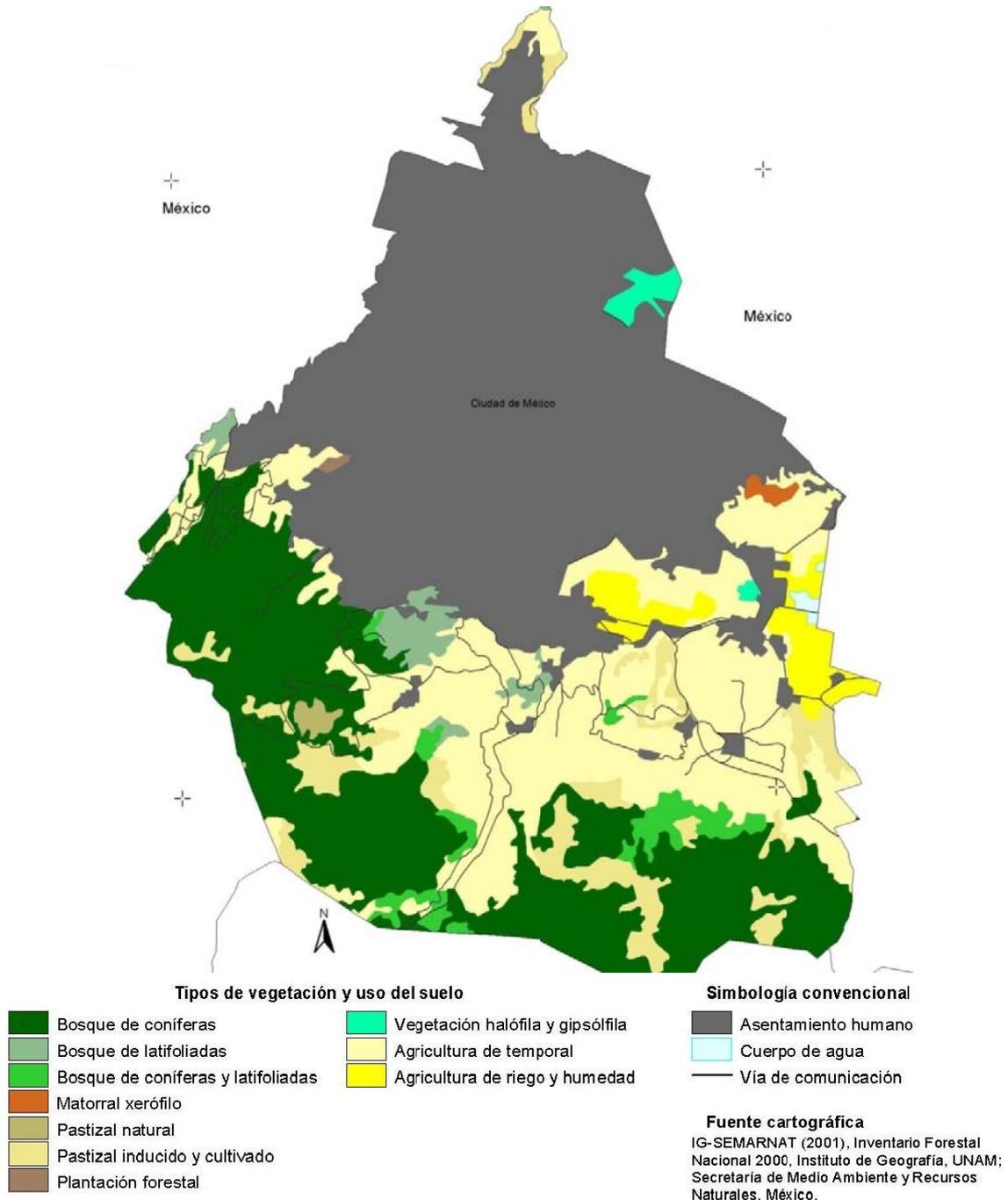


Figura 2.6 Uso del suelo en el distrito Federal.



Un mapa del Estado de México, que contiene los municipios con mayor población, ellos junto con el Distrito Federal integran la Zona Metropolitana del Valle de México.

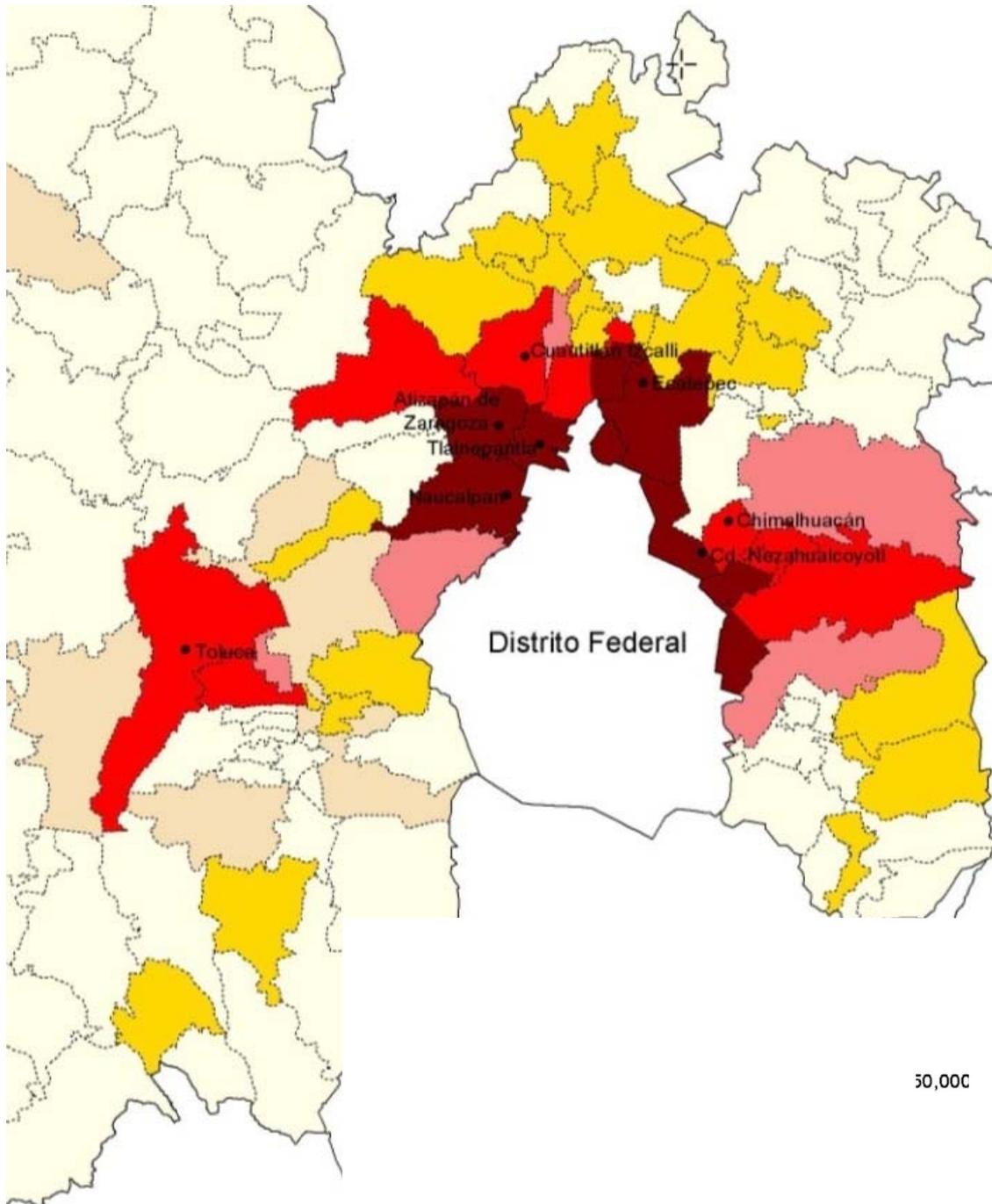


Figura 2.7 Regiones del estado de México, y su nivel de urbanización.



Como se aprecia en el mapa de la figura 2.4, la ubicación de la av. Insurgentes es justamente, la de eje norte sur, en la región muy altamente poblada de la ZMVM. Por otra parte, en el estado de México, las densidades de población son muy similares según se mostro en la página 50, con valores muy cercanos a los 150 habitantes por hectárea.

La estimación población es un índice acerca de la necesidad del transporte en determinadas zonas del Valle de México. Cabe mencionar, que durante el día existen concentraciones mayores dentro del valle, estas se presentan en diferentes regiones durante los periodos de tiempo determinados por horarios de oficina, escuela, etc. Además que a lo largo de la Av. Insurgentes, existen centros de atracción de personas, asociados a la actividad de cada región, para determinar la intención del viaje, y con ello estimar los volúmenes reales de demanda de transporte en la zona, se utilizara la Encuesta Origen Destino del 2007, y se aislara el corredor, según los medios de transporte que influyen en la zona y las regiones del Distrito Federal que interactúan en el transporte de pasajeros en la Av. Insurgentes.

2.3 Delimitación geográfica del corredor.

La relacione que el corredor de trasporte tiene con su entorno geográfico, se divide de acuerdo a las siguientes tres categorías:

- a. Según los puntos o regiones ubicados sobre el corredor y que son elementos de atracción de viaje, para ellos, se considera una distancia máxima de 500 metros, la cual permite un traslado a pie desde la Av. Insurgentes, hasta ese sitio:
 - i. Centros de trabajo, escuelas, hospitales y oficinas de gobierno
 - ii. Centros de comercio.
 - iii. Zonas recreativas y culturales.

Los sitios ubicados en esta franja, son considerados como zona de atracción de la Av. Insurgentes.

- b. En caso de que la distancia adicional en el traslado del usuario, exceda los 500 metros, se considera que este, utilizará algún medio de transporte adicional (red de alimentación) que concurre a determinado punto de la Av. Insurgentes, en algún centro de transferencia. Este caso, es la perspectiva de la av. Insurgentes cono parte de una red de transporte más amplia, y limita su uso al de vía de transporte transitoria. La intención del viaje sigue siendo la misma que en el inciso anterior de este capítulo: centro de trabajo, escuela, etcétera.
- c. Finalmente el uso de la avenida dentro de la red global del Distrito Federal, es función de las regiones que se comunican a través del corredor. En áreas de alta concentración habitacional, se desea acceder a zonas donde la actividad tiene preponderantemente usos comerciales,



industriales, académicos, servicios de salud, culturales y recreativos, así como de la administración pública: gobiernos locales, estatales y federales.

En la figura siguiente, se esquematizan las relaciones físicas de las regiones asociadas al corredor de pasajeros Insurgentes. La idea expuesta el esquema mostrado, es únicamente de ilustrar el concepto que más adelante se utilizará para generar la red. En el esquema se divide el corredor, en tres partes, centro, sur y norte; cada una de ellas con su región en el Valle de México. Los destinos posibles, así como sus orígenes pueden encontrarse dentro de la Av. Insurgentes o no, sin en margo es el recorrido dentro del corredor lo que nos ocupa, volumen de tránsito, tiempo de traslado velocidad, etc.

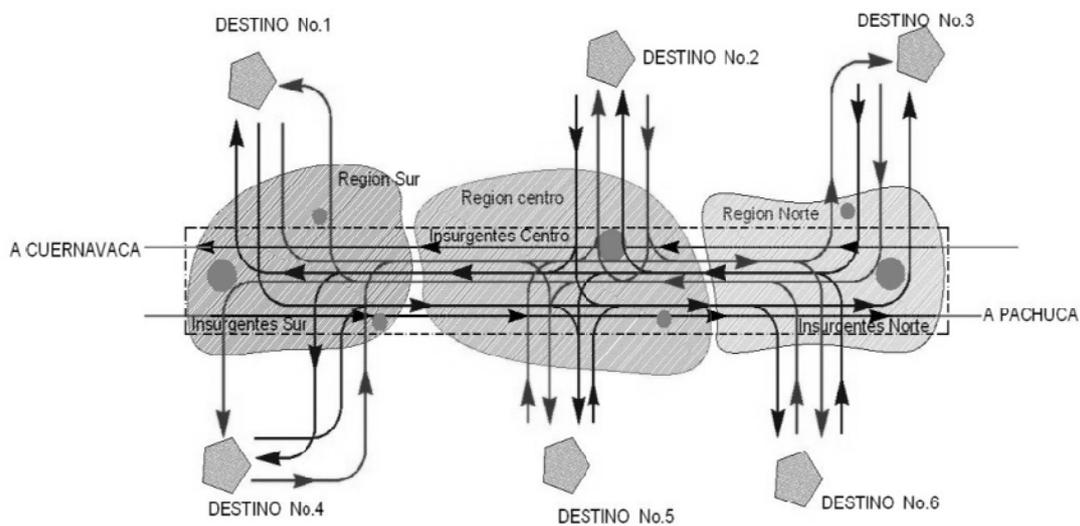


Figura 2.8 Esquema de interacción de regiones y un corredor de transporte.

Una red más detallada del corredor y sus regiones de influencia se muestran en el mapa de la siguiente página, en donde se tiene la avenida Insurgentes como eje de la red (en realidad es el eje del transporte de pasajeros de la ciudad de México). Para ello se muestran, además las principales vialidades, que forman la red del Distrito Federal.



Figura 2.9 mapa de la principal red vial del Distrito Federal.

Este mapa muestra, además los nodos del STC metro, ubicados en el corredor, que como se verá más adelante, tienen un enorme impacto sobre la Av. Insurgentes.



2.4 Modos de transporte en el corredor y métodos de aforo.

Actualmente sólo el sistema Metrobús recorre en su totalidad la avenida Insurgentes. Además, el STC Metro ofrece el servicio en la región norte, desde Indios Verdes, hasta La Raza; y continúa con algunas estaciones, principal mente en la región centro de la Avenida. Una red de microbuses, autobuses RTP, y Trolebuses completan la red de transporte público del corredor, operando en conjunto con los modos de transporte público-privado (taxi) y privado (auto particular), forman el total de modos de transporte que actualmente brindan el servicio.

En este capítulo analizaremos la demanda que existe actualmente sobre estos modos de transporte, la influencia que ejercen las regiones del Valle de México sobre otras, es decir su interacción geográfica, poblacional y económica, misma que se refleja en la utilización del corredor, para ello nos valdremos de información geodemográfica, poblacional, datos de tránsito y económica.

El muestreo empleado en la EOD 2007 lo conforman la información cartográfica y los inventarios de vivienda obtenidos en el II Censo de Población y Vivienda 2005. El tamaño de la muestra se calculó con base en el promedio de viajes por vivienda, resultando 360 viviendas a nivel distrito. El total de la muestra, considerando 83 distritos para el Distrito Federal, fue de 29,880 viviendas; en el Estado de México, con 72 distritos, se tuvieron 25,920 viviendas. Así, el tamaño de muestra total fue de 55,800 viviendas. El tamaño de las unidades de muestreo en áreas urbanas fue de entre 20 y 80 viviendas, y el de las rurales de entre 40 y 80 seleccionando un promedio de cinco viviendas.

Para complementar la información suministrada por la EOD 2007, se realizaron aforos, dentro y fuera del sistema Metrobús, con la finalidad de estimar la cantidad de usuarios del servicio, el cual monopoliza el movimiento de personas a través del de corredor.

El aforo se realizó con 2 objetivos:

1. Estimar el número de usuarios que se desplaza por cada estación del sistema Metrobús: ¿Cuántos entran y cuantos salen por cada estación?
2. Recolectar información acerca de la intención del destino del usuario dentro del sistema Metrobús.

Fuera del sistema Metrobús, se aforaron los vehículos que circulan por Insurgentes, el objetivo principal de este aforo fue el de conocer el número total de vehículos en hora pico, así como determinar el porcentaje de transporte público-privado (taxis), de que hacen uso los transeúntes de la región.

Para el primer caso, Metrobús, se planteará la matriz de origen destino correspondiente al corredor, a partir de la cual se conocerá el posible crecimiento de la demanda de transporte.



El levantamiento de los datos, en lo que respecta sistema Metrobús, se realizó mediante la observación directa en hora pico (7-8 am) de todas las estaciones durante periodos de 30 minutos y se empleo un total de 4 semanas, en el periodo de octubre-noviembre 2011 de 2 personas, demás se selecciono aleatoriamente al 10% de los usuarios para preguntar sobre su destino dentro del sistema (estación destino). Con estos datos fue posible construir la matriz de origen destino mostrado en el siguiente capítulo.

En el caso de los vehículos particulares, la información se utilizó con la finalidad de establecer el nivel de servicio de la vialidad en los tramos siguientes:

- Eje 5 norte (Montevideo).
- Eje 3 norte (Cuitláhuac).
- Eje 1 norte (Mosqueta)
- Puente de Alvarado.
- Av. Chapultepec.
- Eje 3 sur Baja California.
- Eje 5 sur.
- Rio Mixcoac.
- Eje 10 sur (Copilco)

Además se tomaron los tiempos de semáforos, y es midió directamente la velocidad promedio en dos horas diferentes del día de 8-9 am y 11-12 am, con esta información se plantearon las curvas de desempeño de la vialidad según los tramos:

- Caseta - eje 5 norte.
- Montevideo- Cuitláhuac.
- Cuitláhuac - Mosqueta.
- Mosqueta - Puente de Alvarado.
- Puente de Alvarado Av. Chapultepec.
- Av. Chapultepec – Baja California
- Baja California - Eje 5 sur.
- Eje 5 sur – Mixcoac.
- Mixcoac – Copilco.

Esta información, en conjunto con la proporcionada por el Consejo Nacional de Población, deberán emularan los escenarios para los que se realiza este trabajo. La modelación del flujo de transporte de la Av. Insurgentes.



“Si consigo ver más lejos es porque he conseguido auparme a hombros de gigantes.”
Isaac Newton (1643-1727).

CAPITULO III. PERSPECTIVAS DE TRANSPORTE DE PASAJEROS EN LA AV. INSURGENTES.

3.1 Funcionamiento actual del corredor.

Como resultado del aforo de las 45 estaciones de Metrobús se obtuvieron los siguientes datos, típicos para un día hábil de la semana, en periodo de clases, tanto en la Secretaria de Educación Pública como en la UNAM. La hora del aforo corresponde a la hora punta, con máxima demanda, estimada según la EOD-2007 entre las 7:00 y las 8:00 am. En la figura 3.1 se muestra con permiso del sistema, un mapa de la línea uno del Metrobús, en donde es posible apreciar las estaciones referidas.



Figura 3.1 Línea 1 del Metrobús: Corredor insurgentes.



En la tabla que sigue se presentan los datos observados:

No.	Estación	Usuarios	
		entran	Salen
1	Indios Verdes	6,432	1,152
2	Deportivo 18 marzo	924	864
3	Euskaro	231	180
4	Potrero	693	270
5	La Raza	1,113	648
6	Circuito	357	216
7	San Simón	546	162
8	Manuel González	651	306
9	Buenavista	3,234	1,728
10	El Chopo	252	1,116
11	Plaza de la República	441	810
12	Reforma	3,045	1,314
13	Hamburgo	1,176	1,728
14	Insurgentes	4,224	3,078
15	Durango	1,386	2,250
16	Álvaro Obregón	1,068	1,728
17	Sonora	588	1,584
18	Campeche	804	1,152
19	Chilpancingo	1,520	1,644
20	Nuevo León	696	1,332
21	La Piedad	792	1,368
22	Poliforum	852	1,164
23	Nápoles	864	1,056
24	Colonia del Valle	1,308	816
25	Ciudad de los deportes	1,176	900
26	Panque Hundido	852	1,368
27	Félix Cuevas	408	2,760
28	Río Churubusco	648	2,232
29	Teatro Insurgentes	732	2,088
30	José Ma. Velazco	192	1,428
31	Francia	792	1,392
32	Olivo	936	1,956
33	AltaVista	1,162	1,752
34	La Bombilla	1,436	2,782
35	Dr. Gálvez	1,736	3,084
36	C.U	210	948
37	C.C.U	98	156
38	Perisur	210	1,368
39	Villa Olímpica	364	252
40	Corregidora	308	672
41	Ayuntamiento	490	936
42	Fuentes Brotantes	686	1,152
43	Sta. Úrsula	882	1,344
44	La Joya	1,078	1,716
45	EL caminero	1,162	2,004
	Totales	48,755	59,956



Una distribución de viajes en 24 horas, elaborada por INEGI, y que se tiene en la EOD-2007, se muestra a continuación. Con la variante, que los viajes totales corresponden a los viajes realizados en el corredor durante el día, por ello se representa aquí el porcentaje que representa en cada hora del día.

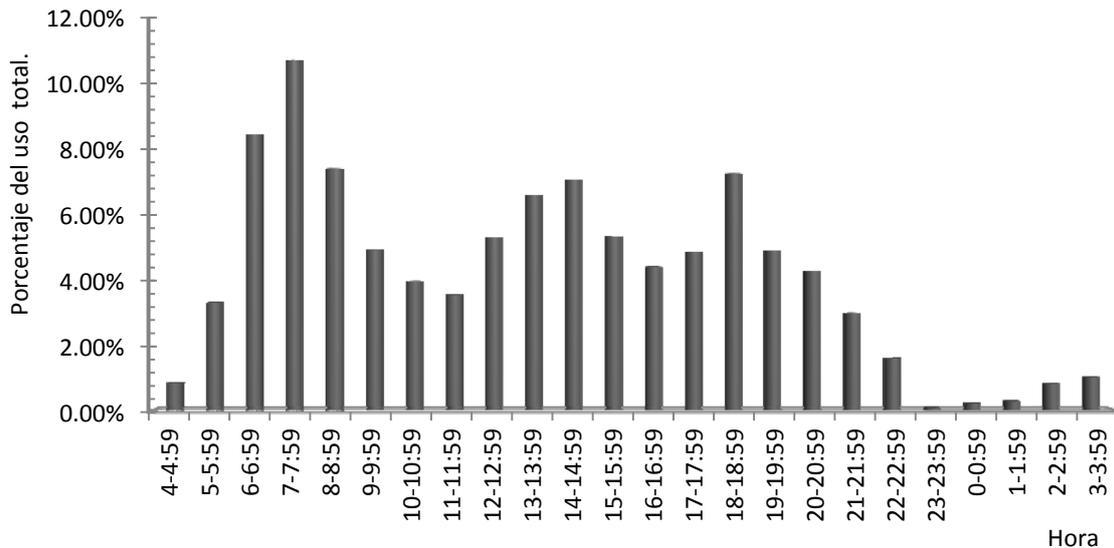


Figura 3.2 Gráfica sobre el uso del corredor en 24 horas al día, en un día típico laboral.

Si se asume que el total de usuarios contados mediante aforo directo, corresponde al porcentaje que representa la barra número cuatro, entonces podemos calcular el total de viajes diarios que se realizan en Metrobús en el corredor.

Por otra parte, si se sabe que el total de viajes registrados, corresponde a los viajeros que entraron al sistema así como los que salieron de este se tiene un total de 108,711, para hora punta del día. Mismos que habrán de distribuirse de la forma siguiente a lo largo del día.

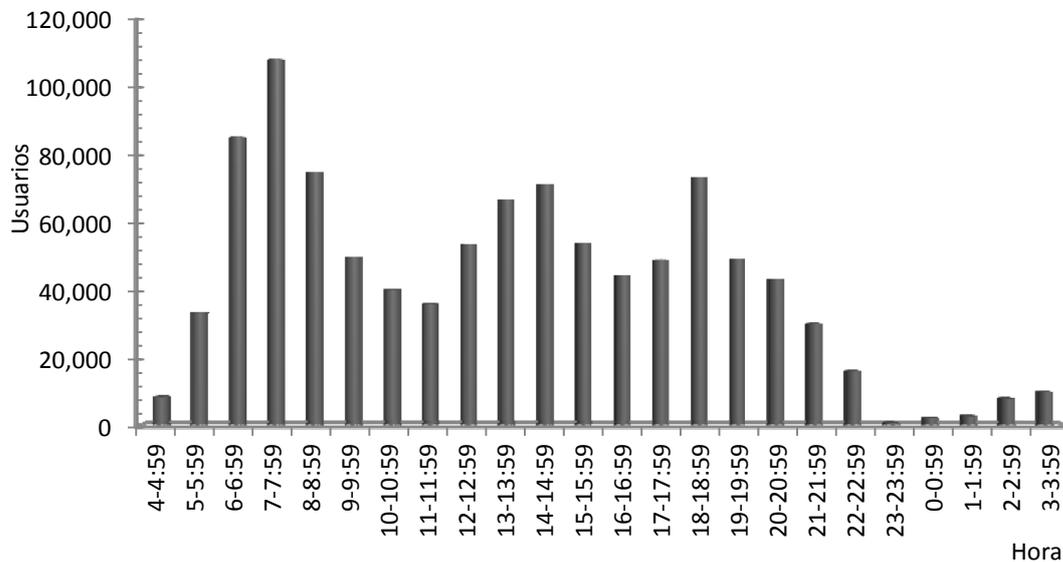


Figura 3.3 Gráfica del flujo de pasajeros en el corredor en 24 horas por día.

La integración de todos los viajes es un indicador de movimiento total de pasajeros por día en el sistema, a saber: 261,012 personas. Es bien sabido que la distribución anual no es uniforme y que varía según los días de la semana, y la temporada del año. Sin embargo lo que interesa a este trabajo es el funcionamiento del corredor en condiciones de máxima demanda.

Es importante, resaltar algunos de los aspectos que caracterizan el funcionamiento global, ya que existen circuitos dentro del sistema que se encargan de maximizar la oferta en las horas de máxima demanda, en regiones específicas del corredor, estos circuitos son los siguientes:

- Indios Verdes – Insurgentes.
- Indios Verdes – Colonia del valle.
- Indios Verdes – Dr. Gálvez.
- Indios Verdes – El Caminero.
- Buenavista – Dr. Gálvez.
- Buenavista – El Caminero.

En el sentido norte –sur, y en el otro sentido solo están presentes los circuitos:

- El caminero – Buenavista
- El caminero – Indios Verdes

Un esquema de estos tramos se muestra en la página siguiente.



Durante el muestreo se realizó una segunda labor, que consistió en conocer la intención del viaje en el sistema, para ello se preguntó a las personas cual es su estación de destino, los resultados se muestran en las páginas siguientes.

Se pregunto al 10 % de las personas contadas sobre su intención de viaje dentro del sistema, es decir la estación destino, la pregunta se realizó únicamente a los usuarios que accedieron al sistema, de esta forma, extrapolando los resultados al periodo pico del día, se obtuvo la siguiente matriz origen-destino en el corredor.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ
O1	74	132	982	1,856	1,721	798	925	614	71	14	7,187
O2	49	246	360	768	1,214	317	256	184	33	49	3,477
O3	78	124	896	1,712	1,845	1,669	1,213	977	19	248	8,781
O4	56	96	969	1,098	1,925	1,317	1,175	1,341	798	609	9,384
O5	12	23	467	1,421	1,326	1,517	1,812	1,712	712	511	9,513
O6	17	20	336	1,096	1,285	919	1,475	945	412	926	7,431
O7	22	77	76	1,217	985	985	1,238	1,005	426	985	7,016
O8	63	41	39	712	45	549	670	683	399	670	3,871
O9	54	36	11	416	67	443	72	68	298	67	1,532
O10	39	29	54	215	124	355	753	125	54	15	1,763
Σ	464.00	823.98	4,190	10,511	10,537	8,869	9,590	7,654	3,222	4,094	59,956

La región sombreada de la matriz, corresponde a los viajes realizados entre Buenavista y José Ma. Velazco, de acuerdo con la zonificación mostrada en la página anterior, en donde además se muestran las estaciones del Metrobús que corresponden a cada par de zonas origen, destino (O_i, D_j).

Resulta evidente que la mayor actividad del corredor, se presenta en viajes que se dan en las regiones, 3. Buenavista, 4. Insurgentes, 5. Chilpancingo, 6. Félix cuevas y 7. J. Ma. Velazco. La tendencia de destino a lo largo del corredor, en el sentido norte sur, en la hora punta matutina se tal como se muestra en la grafica de la figura 3.4.

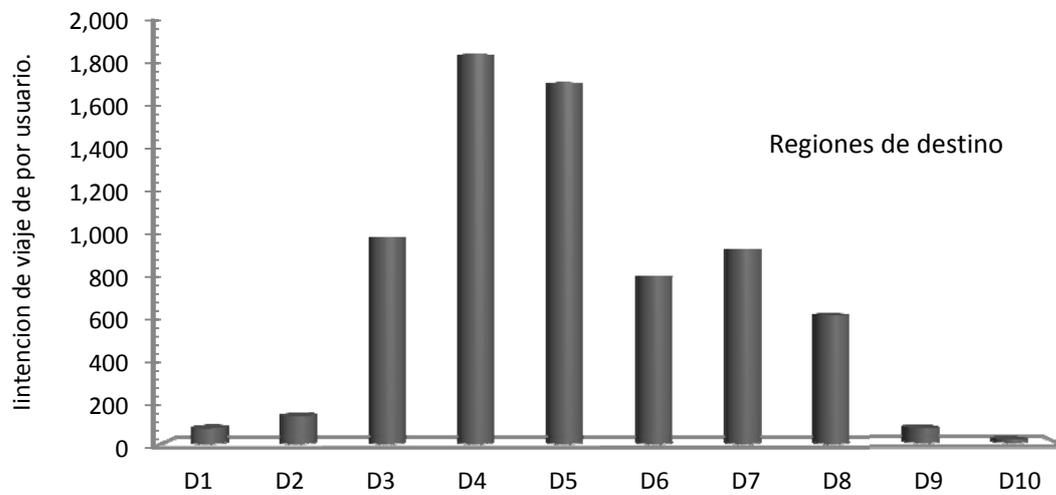


Figura 3.5 Gráfica de los Principales destinos observados desde CETRAM Indios Verdes

Análogamente, la intención del viaje desde el caminero se muestra en la siguiente gráfica:

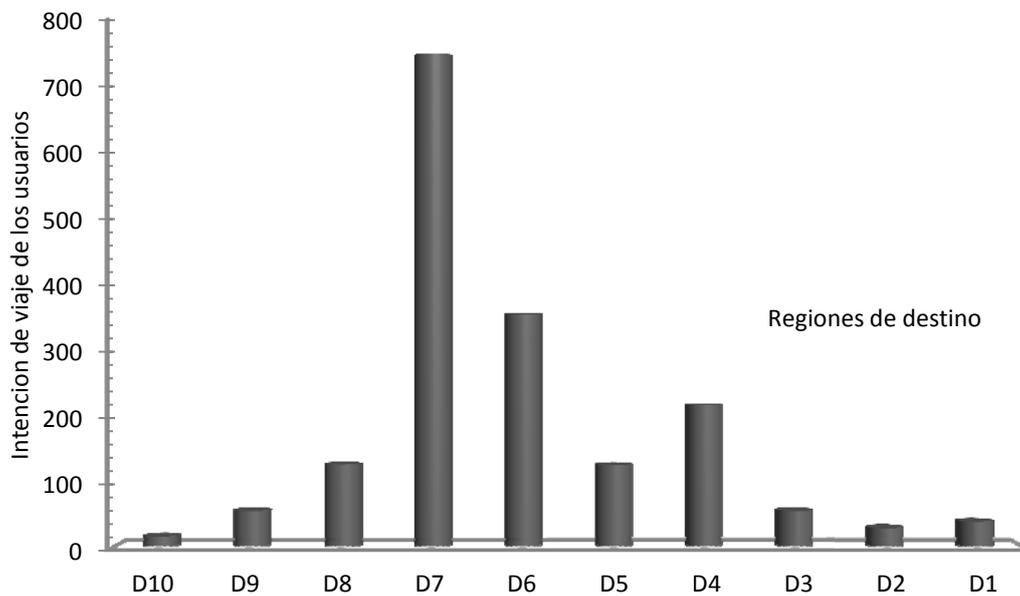


Figura 3.6 Gráfica de los principales destinos observados desde CETRAM el caminero

Estas tendencias están manifiestas en los circuitos que conforman el corredor Metrobús línea 1, los que operan según sea necesario; por día de la semana y temporada del año.



En la página siguiente se muestra un mapa con el tema de la ocupación del corredor, para las distintas regiones principales. Para la realización de este mapa, utilizo el aforo de pasajeros en el sistema Metrobús.

Como se aprecia el impacto del STC Metro sobre el corredor es significativo, tanto en las estaciones que se encuentran en el norte: Indios Verdes y Buenavista, como en las que se encuentran la región centro-sur. Este fenómeno es como se menciona con anterioridad, derivado del uso del suelo en el estado de México, al norte del la ZMVM. Es decir que las regiones norte del distrito federal y estado de México son grandes productor de viajes concentrando una gran cantidad en la región central del corredor, particularmente la región localizada en las delegaciones Cuauhtémoc, Benito Juárez, Coyoacán y Álvaro Obregón. Estas últimas también se ven afectadas por el flujo usuarios que converge al corredor, a través de las estaciones del metro Insurgentes y Chilpancingo, las cuales aportan al corredor el flujo proveniente del oriente del Distrito Federal y el estado de México.

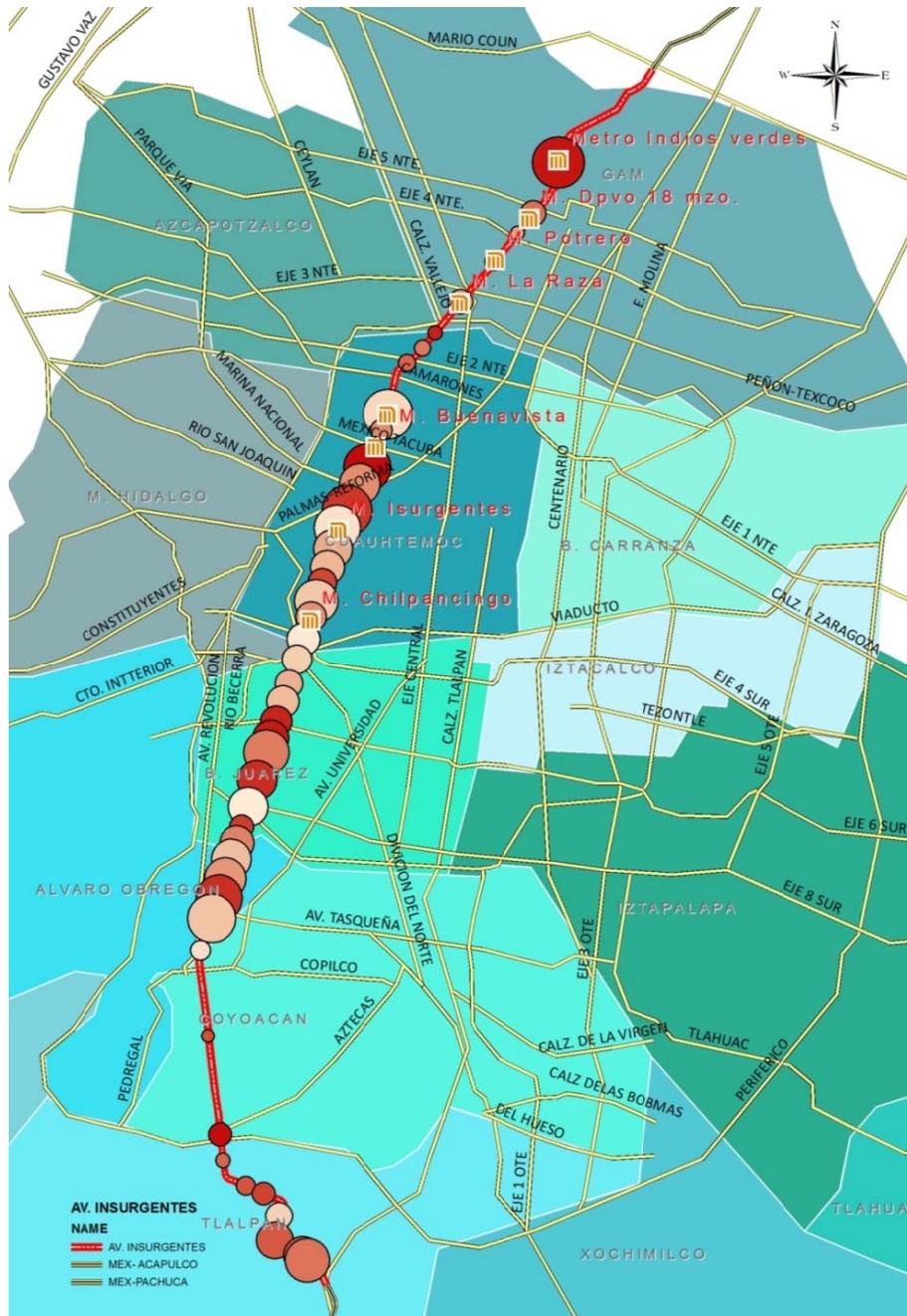


Figura 3.7 Mapa de ocupación del corredor insurgentes.



3.1.1 Velocidad y tiempo de traslado.

La página de internet del corredor Insurgentes Metrobús, informa que en hora pico, el tiempo entre autobuses es de 2.5 minutos, sin embargo, se observó que en realidad este periodo varía sustancialmente (especialmente en horas pico), debido principalmente a la capacidad de la avenida. En regiones particulares, por ejemplo se observa que hay incluso periodos de 4.7 minutos y en muchas ocasiones el tiempo de espera para acceder al autobús es mayor, debido a que los autobuses en estaciones regulares, suelen estar excedidos en su capacidad y el usuario simplemente no puede abordar.

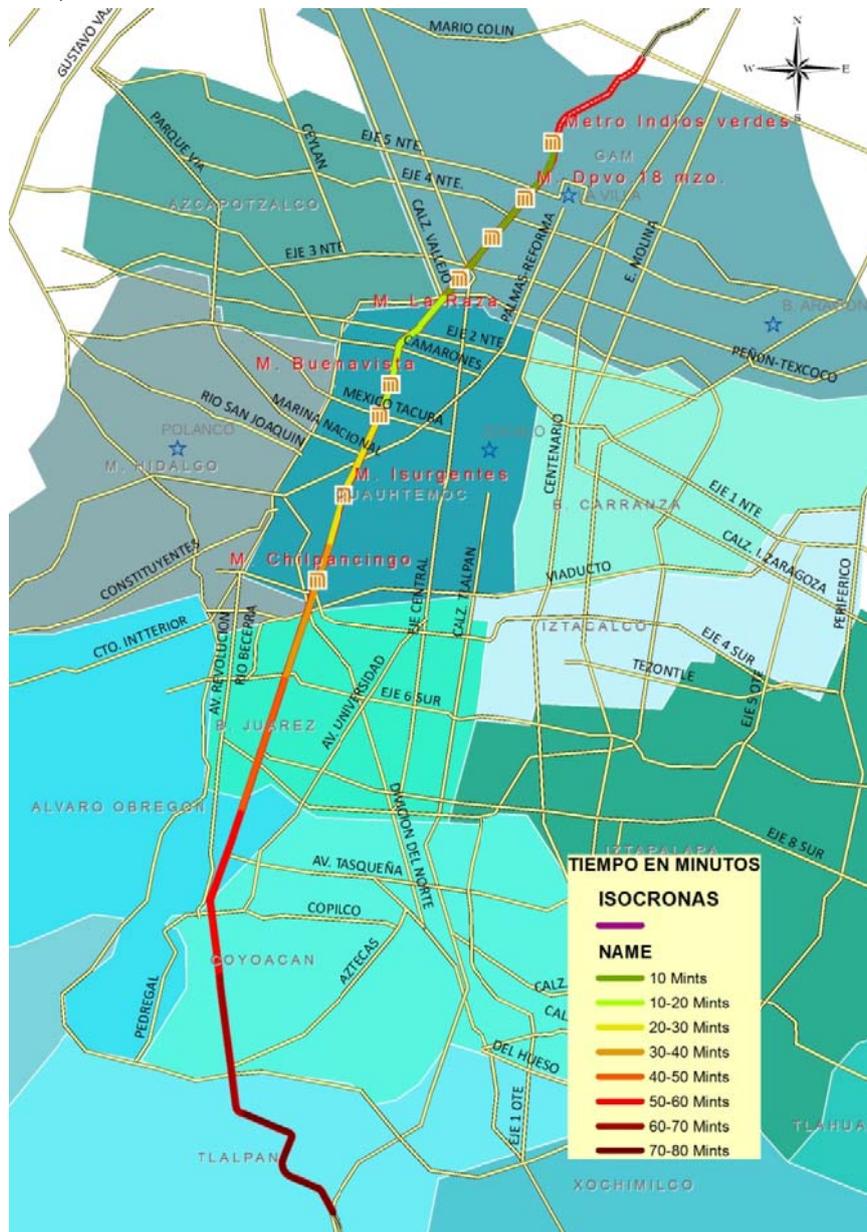


Figura 3.8 Isócronas para el traslado en Metrobús desde la estación Indios Verdes.



Por otra parte, en esta misma página, se afirma que la velocidad promedio del Metrobús es de 19.2 kph, sin embargo este dato no es del todo cierto, ya que a menudo la velocidad se ve reducida sustancialmente, ante el aumento de la demanda, lo que dificulta la operación del sistema. En la página anterior se muestra un mapa de isócrona para el corredor cuando se viaja desde el CETRAM Indios Verdes. En tanto que la isócrona en sentido contrario es mostrada en esta página.

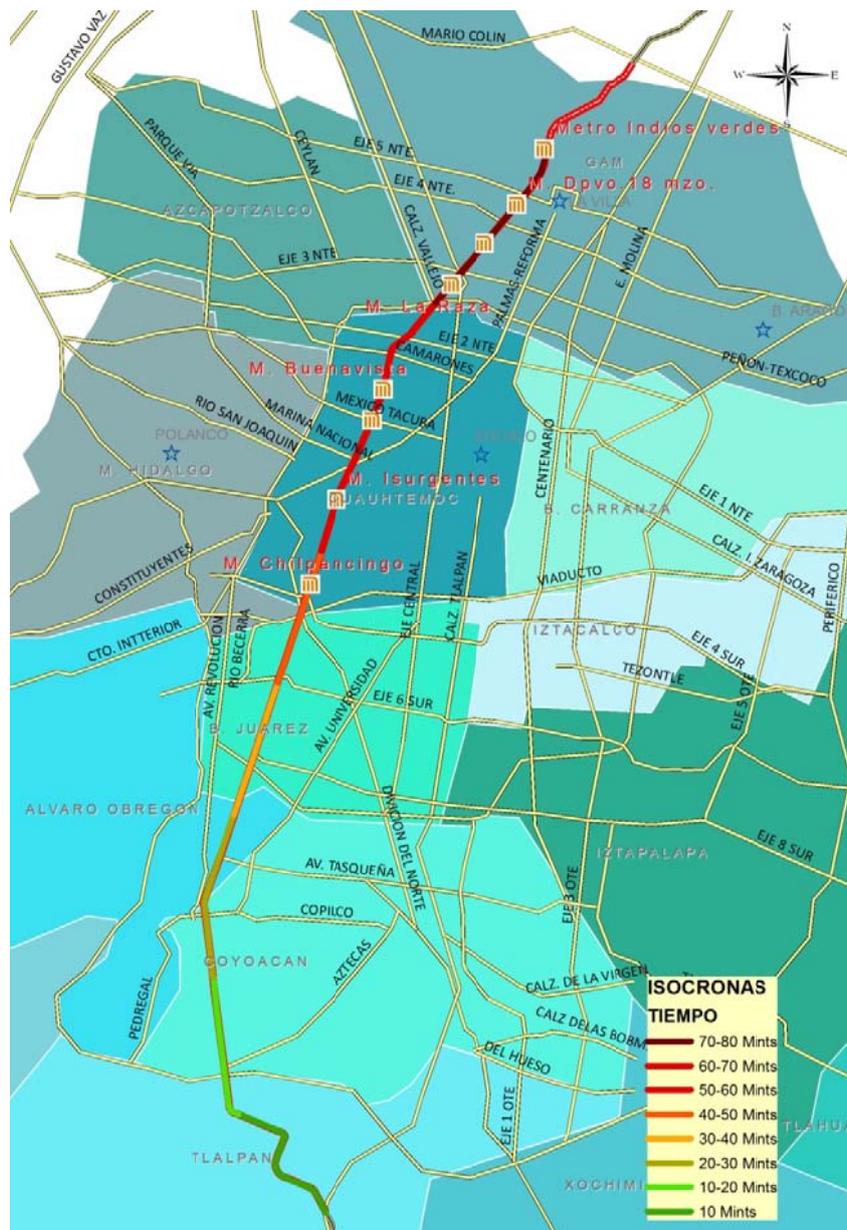


Figura 3.9 Isócronas para el traslado en Metrobús desde la estación Caminero.



Una vez que el usuario accede al transporte los periodos de traslado son razonables, un estudio realizado por SETRAVI 2009, indica que la velocidad media en el Distrito Federal en la hora punta de la mañana oscila entre los 14.7 y los 16.9 kph., razón por la cual el Metrobús presenta ventaja respecto al auto particular en este rubro. El carril exclusivo ofrece ventaja sobre la vía libre, este aspecto se analizara más adelante, cuando se revisen las condiciones de tránsito vehicular en todo el corredor, y se evalúe en nivel de servicio para los dos modos de transporte.

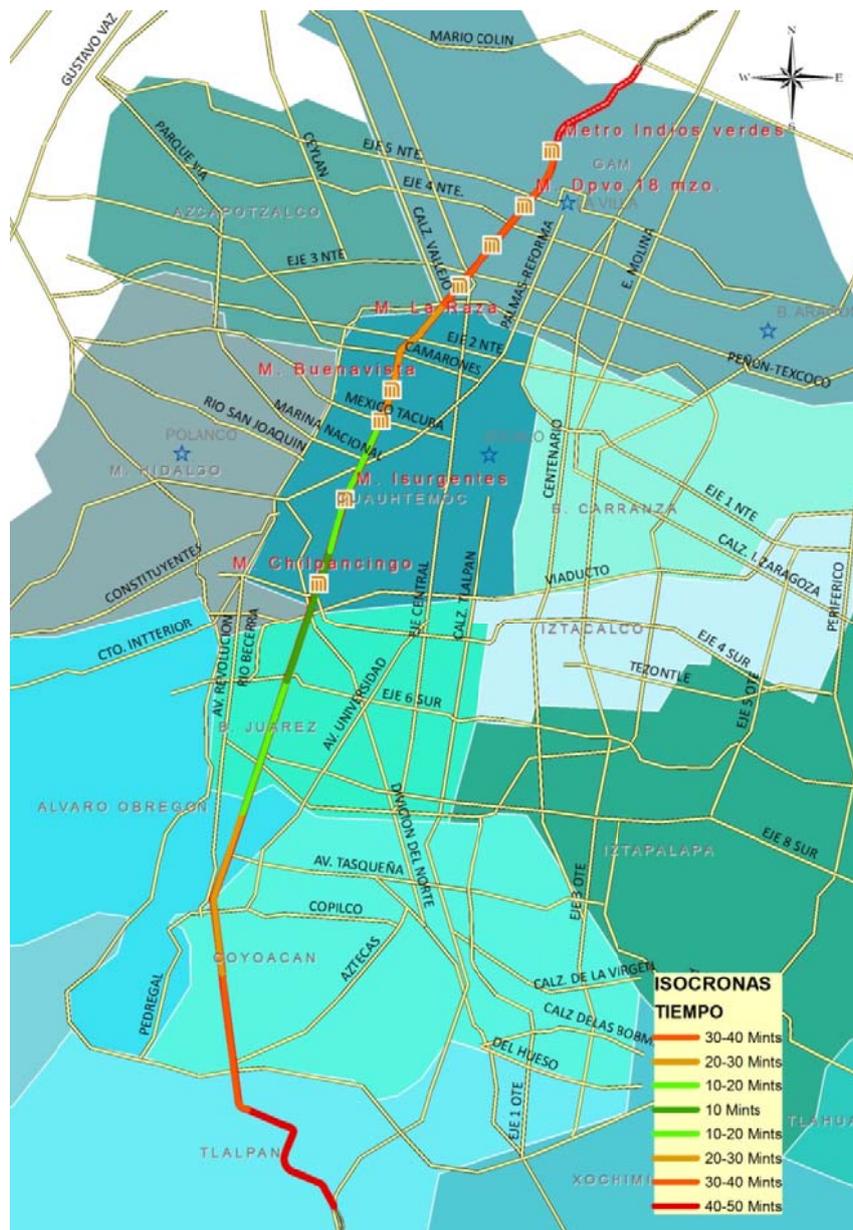


Figura 3.10 Isócronas para el traslado en Metrobús desde la estación Chilpancingo.



El tiempo que puede tener un usuario al acceder al servicio suele variar y en algunos casos es muy alto, hasta de 15 minutos, este es quizá el mayor punto débil de los defensores del sistema. El tiempo de acceso es mayor en las horas pico, debido en parte debido a la saturación del servicio, situación que actualmente ni el gobierno del Distrito Federal, ni los organismos operadores del corredor admiten. Para sustentar esta teoría, a continuación se realizara el cálculo del periodo e intervalo en la hora punta, esto con la intención de establecer el nivel de servicio de la operación actual.

3.1.2 Periodo e intervalo.

El problema descrito en el inciso anterior, no está relacionado únicamente, a la accesibilidad al sistema Metrobús, sino que en la actualidad también lo está con la capacidad de sus carriles confinados; debido a que en gran medida, los autobuses, detienen la marcha debido al congestionamiento de la vía, se puede especular sobre la capacidad del sistema en conjunto ya que el congestionamiento, genera retrasos en los periodo de arribo a las estaciones y por ende en el traslado en general.

No es el objetivo principal de este trabajo, realizar una evaluación del sistema Metrobús, sin embargo, al ser el único medio de transporte masivo en el corredor, su funcionamiento, necesariamente está asociado al nivel de servicio que brinda al corredor de transporte. Para ello se hace indispensable calcular el periodo de paso de los autobuses, para que se satisfaga la demanda. Para calcular el intervalo se utiliza la secuencia siguiente:

$$t_1 \longleftarrow \overbrace{\hspace{10em}}^{tc} \longrightarrow t_2$$
$$tc=2(t_r+t_t)$$

En donde t_r y t_t son respectivamente los tiempos de recorrido y de terminal, en este caso se desprecia el tiempo de terminal. Usualmente, se utiliza la expresión siguiente para calcular el número de autobuses necesarios.

$$\# \text{ Veh.} = \frac{Tc}{I}$$

En este caso sólo interesa la frecuencia necesaria para satisfacer la demanda, la cual se calcula con la expresión:

$$Fp = \frac{60}{I}$$

En ambas expresiones se necesita el intervalo, este sea calcula mediante:



$$I = \frac{60 \times CV \times F.o}{HVMD}$$

En donde:

CV = Capacidad vehicular.

$F.o$ = factor de ocupación.

$VHMD$ = Volumen Hora de Máxima Demanda.

$F.p$ = Frecuencia de paso.

De esta manera, y obteniendo el VMHD, de la matriz origen destino, un factor de ocupación del 95 %, y una capacidad vehicular de 200 pasajeros (aproximadamente la correspondiente a una autobús articulado) para la terminal indios Verdes se tiene un intervalo de

$$I = \frac{60 \times 200 \times 0.95}{7,187} = 1.59 \text{ minutos.}$$

Y la frecuencia de paso por hora:

$$Fp = \frac{60}{1.59} = 37.7 \text{ vehiculos- hora}$$

Las cifras calculadas son muy parecidas a las observadas en campo, y ellas explican la dificultad de algunos usuarios para acceder al vehículo en horas pico, además de que demuestran la necesidad de que periódicamente se estén enviando autobuses vacíos, destinados a estaciones diferentes a la terminal Indios Verdes. Por otra parte, sumando la demanda y que existe en el corredor desde indios verdes hasta la Glorieta de Insurgentes, se hace evidente la necesidad de crear circuitos que aumenten la capacidad del sistema en ciertas regiones, tal como se mencionó anteriormente.

Es evidente, que las exigencias sobre el sistema son muy altas, particularmente en horas pico en la región indios verdes- Insurgentes, sin embargo, las condiciones de operación se vuelven aun más complejas a partir de la estación Buenavista, en donde la capacidad de la vía disminuye debido a la concentración de intersecciones con otras vialidades aumentando el número de semáforos y disminuyendo el número de carriles de la vía. El siguiente apartado está destinado a describir cuáles son las características físicas del corredor, así como su capacidad en determinadas regiones.



3.2 La Avenida Insurgentes y su capacidad.

Parte del presente estudio se aforaron los vehículos que circulan por la avenida Insurgentes. Con estos aforos, se pretende establecer algunas de las características con las que opera el corredor vial. Principalmente se desea encontrar la velocidad con la que es posible desplazarse en la vía; así como mostrar algunas preferencias en su utilización. Aquí se muestran algunos resultados:

Región	Dirección-sentido		Vehículos		
			Taxis	Otros	Total
Euskaro		norte-sur	1,341	5,793	6,108
	Sur-norte		1,296	7,805	2,715
La Raza		norte-sur	417	2,235	2,652
	Sur-norte		529	2,079	743
Puente de Alvarado		norte-sur	253	998	1,252
	Sur-norte		216	1,222	1,438
Insurgentes		norte-sur	67	834	901
	Sur-norte		149	738	887
Chilpancingo		norte-sur	328	693	1,021
	Sur-norte		276	1,118	1,393
Eje 5 Sur		norte-sur	1,045	1,259	2,304
	Sur-norte		1,094	1,319	2,413
Mixcoac		norte-sur	889	1,140	2,029
	Sur-norte		903	1,237	2,139
Ma. Quevedo		norte-sur	1,195	1,475	2,670
	Sur-norte		1,094	1,244	2,338

Tabla 3.1 Resumen de vehículos observados en puntos seleccionados de la Av. Insurgentes, (no se consideran camiones de carga).

El aforo se realizó entre las 7:00 y las 9:00 am, en periodos de martes a jueves, evitando el aforo en días quincenales.

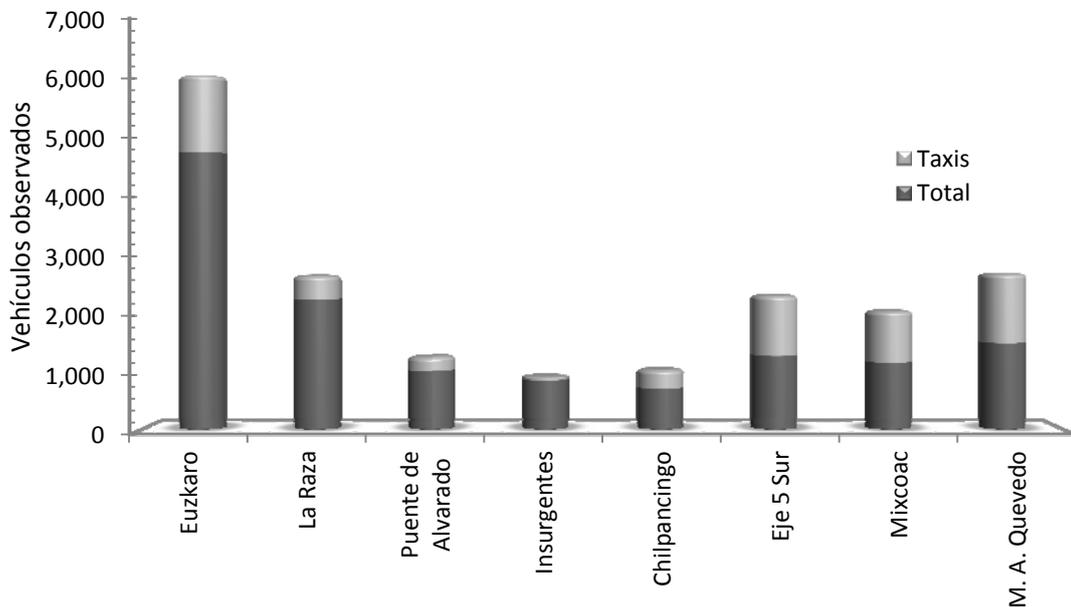


Figura 3.11 Gráfica, porcentaje de taxis observadas en dirección Norte- Sur.

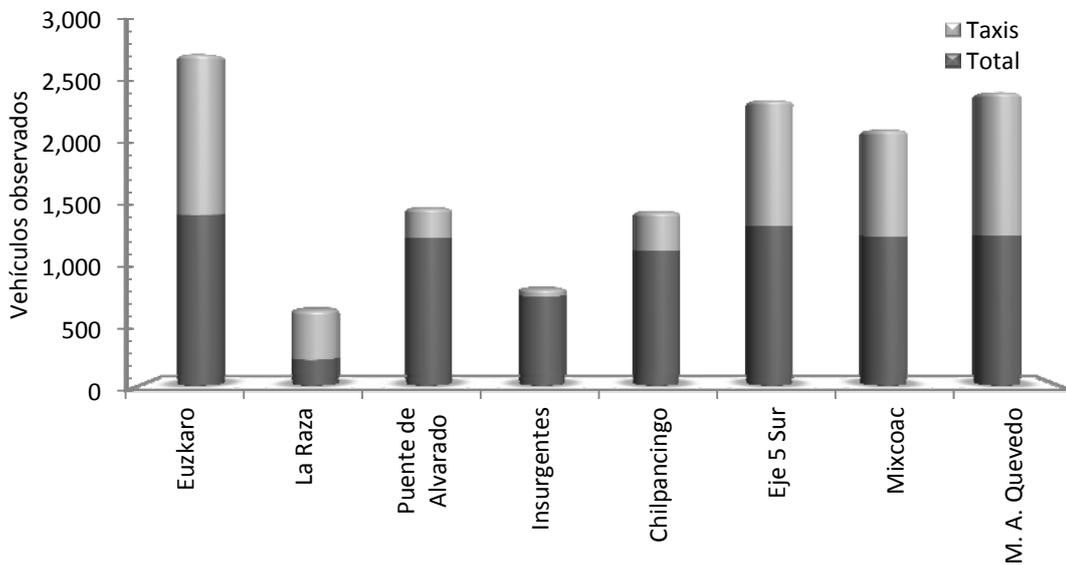


Figura 3.12 Gráfica, porcentaje de taxis observados en dirección Sur –Norte.

Cabe mencionar que la ocupación por vehículo es sumamente baja pues, con un factor de ocupación de 1.8 personas por vehículo, por lo que se estima que se los vehículos son ampliamente “desperdiciados”, debido a que su capacidad suele variar pero rara vez es menor que 4.0. Siendo este un problema que actualmente ocupa a especialistas del transporte en todo el mundo.



La siguiente tabla resume las características físicas y de tránsito del corredor. Más adelante, en este mismo apartado, se mostrarán gráficas que permiten aclarar un poco más la forma en que se comporta el flujo vehicular en la vialidad omitiendo por completo al sistema Metrobús.

Intersección	Dirección	Vehículos				Carriles		Personas desplazadas
		Taxis	Otros	Total	% Taxis	No.	Vel. (Km/hr.)	
Euskaro	norte	1,341	5,793	7,134	0.19	7	27	30,847
	Sur	1,296	7,805	9,101	0.14	7	34	
La Raza	norte	417	2,235	2,652	0.16	5	24	9,993
	Sur	529	2,079	2,608	0.20	5	23	
Puente de Alvarado	norte	253	998	1,252	0.20	3	11	5,110
	Sur	216	1,222	1,438	0.15	3	13	
Insurgentes	norte	67	834	901	0.07	3	8	3,397
	Sur	149	738	887	0.17	3	8	
Chilpancingo	norte	328	693	1,021	0.32	3	9	4,586
	Sur	276	1,118	1,393	0.20	3	12	
Eje 5 Sur	norte	1,045	1,259	2,304	0.45	3	11	8,963
	Sur	1,094	1,319	2,413	0.45	3	12	
Mixcoac	norte	889	1,140	2,029	0.44	3	10	7,920
	Sur	903	1,237	2,139	0.42	3	11	
Ma. Quevedo	norte	1,195	1,475	2,670	0.45	3	13	9,515
	Sur	1,094	1,244	2,338	0.47	3	11	

Tabla 3.2 Resumen de las principales características del flujo vehicular en la Av. Insurgentes (se omite el sistema Metrobús).

La avenida Insurgentes, además de ser una vialidad sumamente larga, también presenta diversos cambios en su sección transversal en su recorrido. Particularmente resalta la diferencia en tamaños entre la región Indios Verdes – La Raza, y puente de Alvarado – Miguel A. Quevedo. Una gráfica de la velocidad media en horas pico en las diferentes regiones de la vialidad hace más evidente la capacidad que tiene el corredor en sus diferentes tramos:

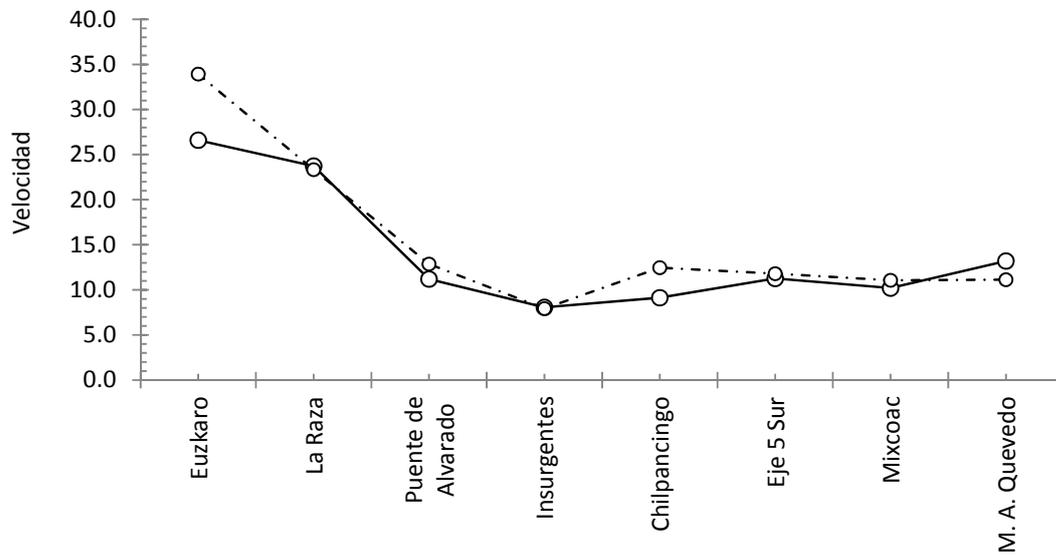


Figura 3.13 Gráfica de la velocidad media observada en Insurgentes, dirección Norte a Sur.

Como se aprecia la velocidad es mayor en el tramo norte de la Avenida, ello es debido principalmente a que en este tramo cuenta con más carriles, sin embargo es posible contrastar, la velocidad con el número de vehículos que utilizan estos tramos. Dicha contrastación se muestra en la grafica siguiente.

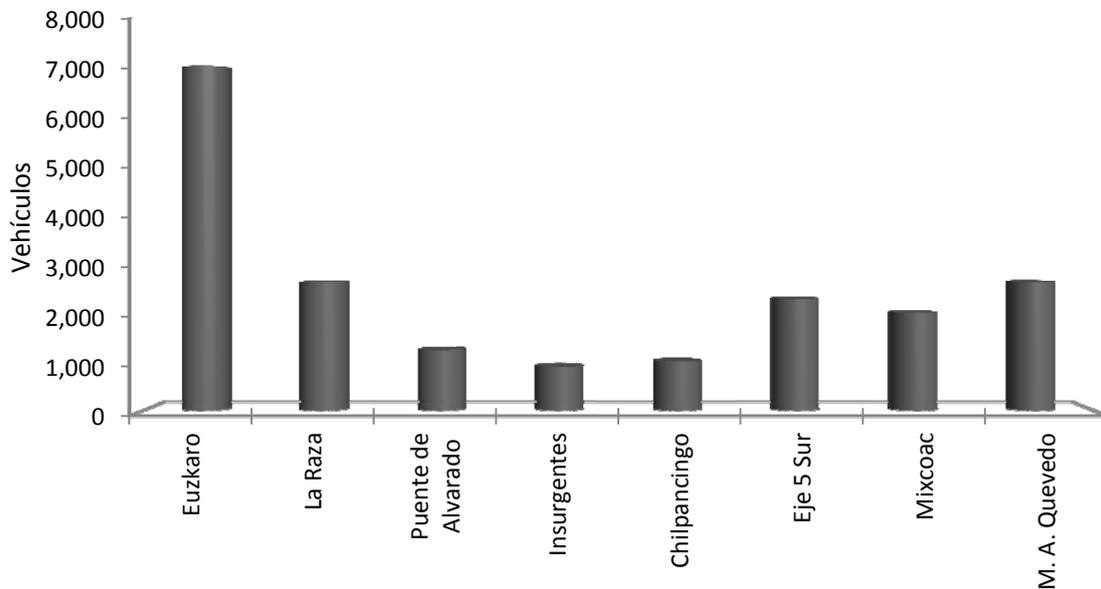


Figura 3.14 Gráfica del número de vehículos en la Av. Insurgentes, en dirección sur-norte, en horario matutino.



Una tendencia similar se observa en la grafica construida con el número de vehículos que circulan en dirección norte sur.

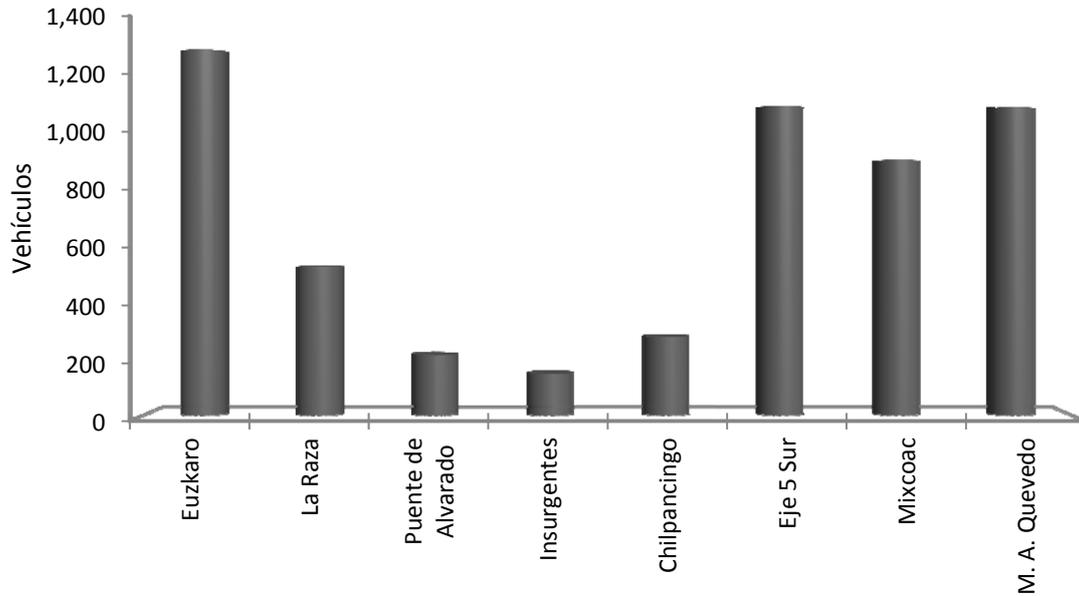
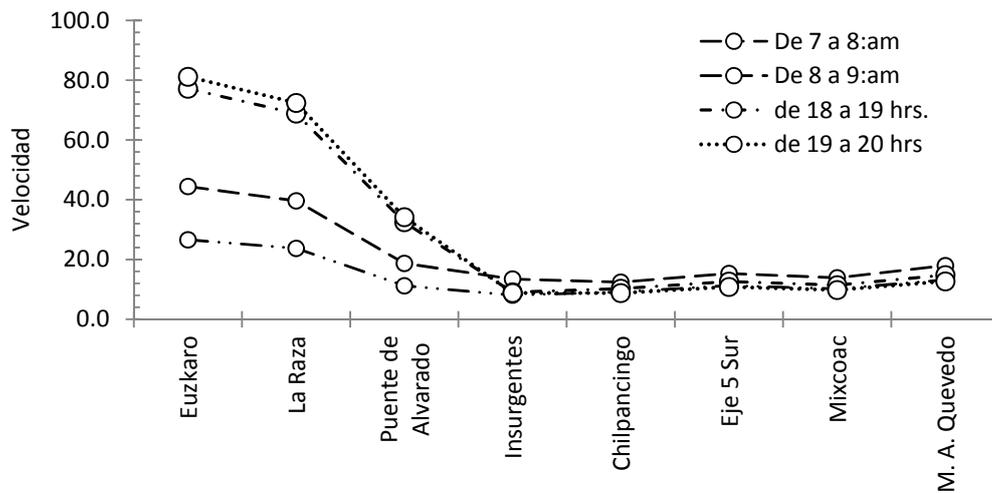


Figura 3.15 Grafica del número de vehículos en la AV. Insurgentes, en dirección norte-sur, en horario matutino.

Es evidente que el número de vehículos por hora es variable, según la hora del día; día de la semana, y temporada del año. Una distribución de velocidades a lo largo del día se muestra a lo largo del día se muestra a continuación.



Grafica 3.16 Velocidad media observada en el corredor en horas específicas, sentido Norte a sur.



Salvo que en la región de La Raza a Euzkaro, donde el corredor amplía su capacidad a siete carriles, la velocidad promedio no supera los 15 kph. Por otra parte, el flujo muestra pocas variaciones importantes según la hora del día, excepto, nuevamente en el tramo entre la Raza y la av. Euzkaro, en donde se ve un incremento significativo en relación a la mañana, cuando generalmente la av. Insurgentes norte se convierte en acceso al distrito federal, y por la tarde existe una menor demanda de este acceso. La tendencia se revierte en el sentido opuesto de sur a norte.

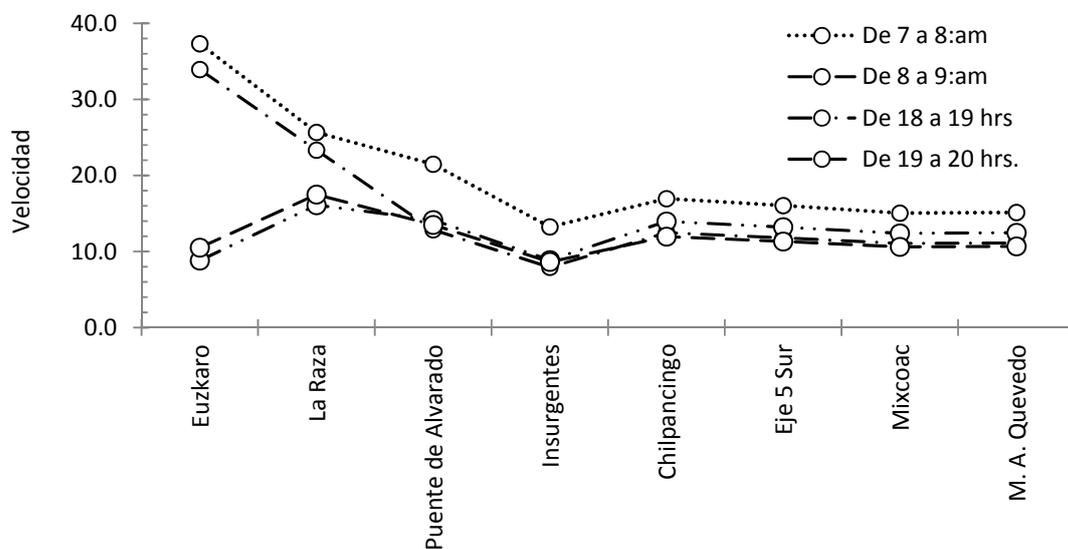


Figura 3.17 Gráfica velocidad media observada en el corredor en horas específicas, sentido Sur a Norte.

Luego de examinar las graficas se pueden hacer las siguientes observaciones:

- Región Indios Verdes – La raza. La capacidad es mayor, con velocidades que oscilan entre los 25 y los 45 kph, en horario matutino en dirección al centro. En tanto que en dirección a Pachuca, la velocidad es bastante buena y rondando los 80 kph. Por la noche la velocidad se ve sustancialmente disminuida 5 y 10 kph, en esta misma dirección, y mejora la velocidad en dirección al centro acercándose casi a los 40 kph.
- A partir de Puente de Alvarado, por la mañana, la velocidad disminuye sustancialmente hasta un mínimo de 10 kph en la glorieta de Insurgentes, en dirección al sur. Por la noche la velocidad se mantiene estable en ambos sentidos.
- A partir de Chilpancingo, se observan velocidades similares en ambos sentidos, tanto en la noche como por la mañana. Aun en las horas de menor demanda, la velocidad, en este tramo, no supera los 15 kph.



3.3 Nivel de servicio de la vialidad Insurgentes.

En la página 32 de este trabajo se mencionaron medidas que se utilizan para medir el desempeño de una vialidad, como se dijo existe una grafica específica, la cual relaciona el tiempo de recorrido de los vehículos y la velocidad, haciendo que el tiempo crezca en relación cuadrática a medida que aumentan los vehículos en la vía, a esto se le conoce como impedancia o resistencia al flujo.

Una velocidad bastante aceptable para regiones urbanas en el mundo es de 40 kph en las vías urbanas y en vías urbanas de altas especificaciones urbanas de 80 kph, sin embargo recientemente se ha venido observando una tendencia a disminuir esta velocidad en medida que las poblaciones aumentan. Mientras que en ciudades pequeñas (de menos de 1'500,000 habitantes), la velocidad promedio es de 35-50 kph, la tendencia en ciudades de mayor tamaño es de disminuir la velocidad. El nivel de servicio tiende a disminuir debido a:

- i. Incremento de la población.
- ii. Incremento de la tasa de motorización.
- iii. La concentración demográfica y,
- iv. Las características topográficas de la vialidad.

Actualmente, En la Avenida Insurgentes no es posible rebasar los 30 km/hr (excepto en ciertos periodos del día en el tramo La Raza - Indios verdes), ni siquiera por la noche, debido en gran parte (además de los vehículos que utilizan la vía), a que existen muchas intersecciones que limitan la aceleración. Existen semáforos no que no permiten una circulación constante por más de 4 km.

Como se menciona al principio de este trabajo mientras que existen factores que obstaculizan la un mejor nivel de servicio, no se ha ampliado la capacidad de la Av. Insurgentes en la Ciudad de México.

Actualmente se cuenta con un déficit importante en oferta de transporte masivo de pasajeros, y una vialidad saturada casi en un 120% si se considera la velocidad como parámetro para estableceré el nivel de servicio. Sin embargo las perspectivas son aun más sugerentes; si se considera que la población sigue creciendo, y la tasa de motorización en aumento. En el siguiente y último apartado de este trabajo se realizara una estimación del posible escenario en el mediano plazo para establecer más ampliamente las condiciones de funcionamiento del corredor vial.



3.4 Funcionamiento del corredor en el horizonte posible a 10 años.

Según el Consejo De Evaluación Del Desarrollo Social Del Distrito Federal, el crecimiento poblacional de la región de la ZMVM es como se muestra en el siguiente mapa.

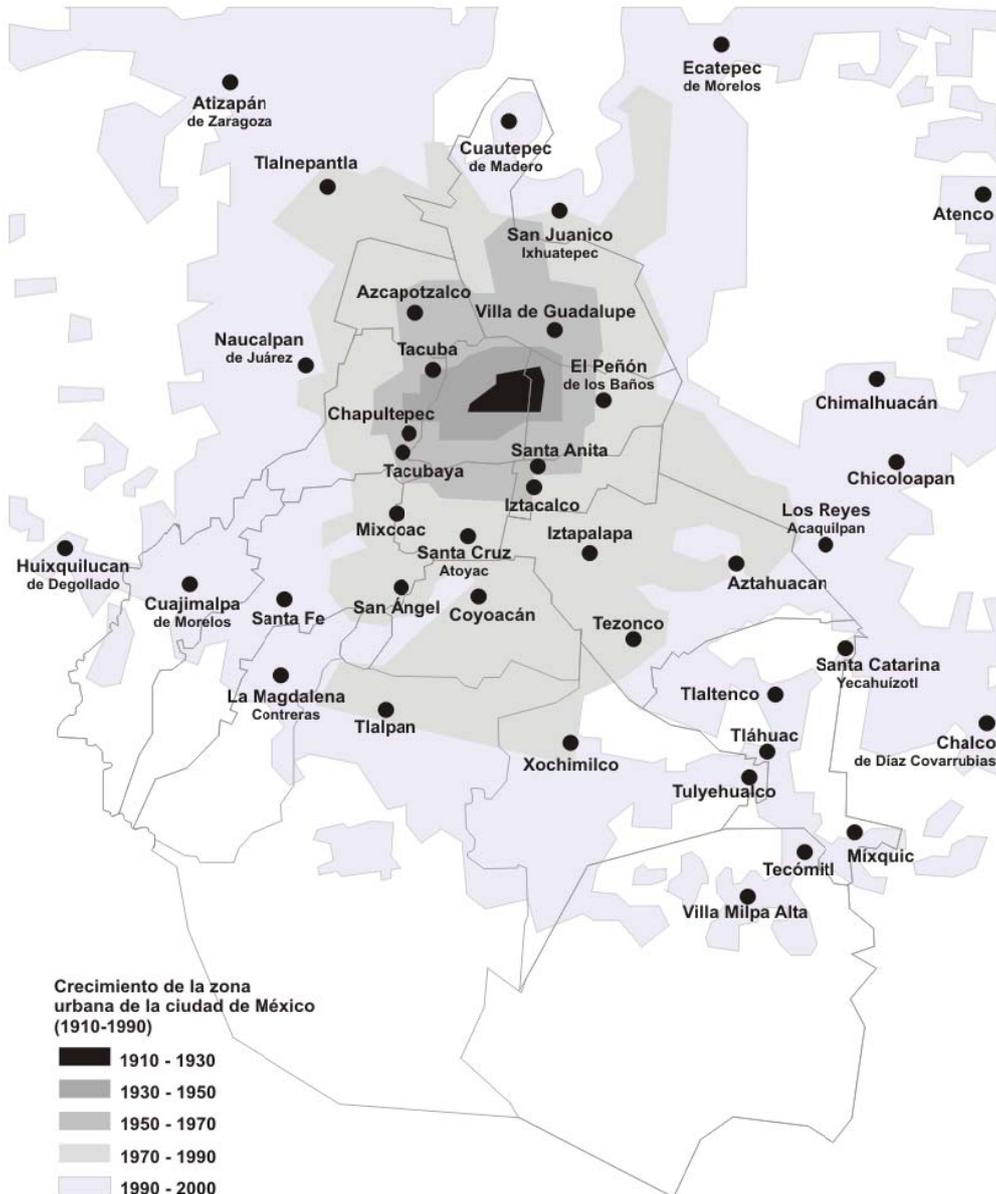


Figura 3.18 Mapa del crecimiento poblacional del Distrito Federal.

Según datos de la CONAPO, actualmente el crecimiento en el Distrito Federal es limitado e incluso durante la década de los noventa hubo un retroceso en el crecimiento de la población, y la tendencia hacia las décadas de 2020 y 2030 marcan el establecimiento de una población prácticamente fija en 8.8 millones de habitantes.



Las políticas de uso del suelo que se han aplicado en el Distrito, han surgido efecto parcialmente, ya que mientras que la población residente del distrito federal no aumenta significativamente, la población flotante sí. En regiones como Santa Fe, Del Valle, y los corredores Reforma e Insurgentes, el número de sitios laborales ha venido en aumento desde hace ya varias décadas, lo cual ha incrementado de manera sustancial la demanda de servicios, agua energía y por supuesto transporte, en la grafica siguiente se muestra el crecimiento de la población en el distrito federal en los últimos 60 años y se presenta una proyección para el año 2020, los datos fueron obtenidos de la página de internet de la CONAPO de diciembre de 2011.

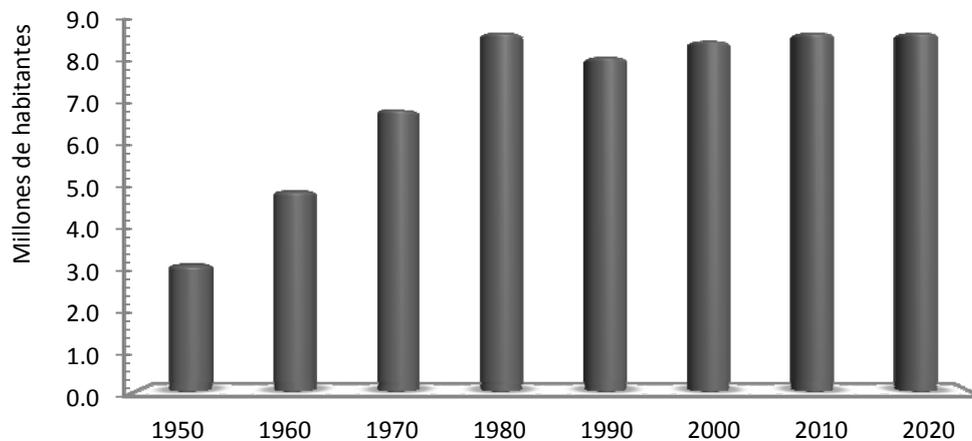


Figura 3.19 Dinámica de la población del Distrito Federal.

Actualmente habitan en el Estado de México cerca de 15 millones de personas de las cuales el 12.8 millones se encuentran ubicados en regiones urbanas y al menos 9 millones viven en la ZMVM. De acuerdo con CONAPO, el crecimiento de la población del Estado de México es como se muestra a continuación.

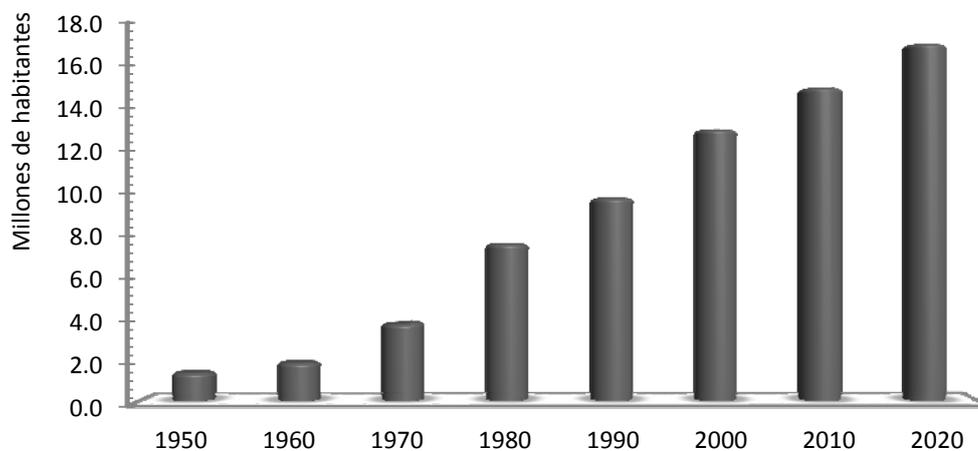


Figura 3.20 Dinámica de la población del Estado de México.



En las graficas anteriores, fácilmente se pone de manifiesto que las tasas de crecimiento son sustancialmente diferentes, donde además el Estado de México registra un mayor incremento anual.

Una forma de cuantificar el número de personas que se trasladan de los municipios conurbados a la región Insurgentes, o que por lo menos utilizan el corredor de transporte es aplicar un modelo de gravedad a la región actual del corredor, para ello se requiere la matriz de origen-destino que se elaboro en apartados anteriores, a saber:

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ
O1	74	132	982	1,856	1,721	798	925	614	71	14	7,187
O2	49	246	360	768	1,214	317	256	184	33	49	3,477
O3	78	124	896	1,712	1,845	1,669	1,213	977	19	248	8,781
O4	56	96	969	1,098	1,925	1,317	1,175	1,341	798	609	9,384
O5	12	23	467	1,421	1,326	1,517	1,812	1,712	712	511	9,513
O6	17	20	336	1,096	1,285	919	1,475	945	412	926	7,431
O7	22	77	76	1,217	985	985	1,238	1,005	426	985	7,016
O8	63	41	39	712	45	549	670	683	399	670	3,871
O9	54	36	11	416	67	443	72	68	298	67	1,532
O10	39	29	54	215	124	355	753	125	54	15	1,763
Σ	464.	823	4,190	10,511	10,537	8,869	9,590	7,654	3,222	4,094	59,956

Esta matriz representa las diez regiones en las que se dividió originalmente el corredor, para este trabajo, y que se muestra en la figura 3.4 ubicada en la página 69. Si se considera que la tasa de crecimiento en el D. F es de 2.6% en tanto que la del Estado de México es de 13.9% se tiene una tasa general de 16.5, así aplicando el factor de crecimiento correspondiente a cada región se obtiene la función objetivo.

O/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ	O _i
O1	74	132	982	1,856	1,721	798	925	614	71	14	7,187	8,186
O2	49	246	360	768	1,214	317	256	184	33	49	3,477	3,960
O3	78	124	896	1,712	1,845	1,669	1,213	977	19	248	8,781	10,001
O4	56	96	969	1,098	1,925	1,317	1,175	1,341	798	609	9,384	10,689
O5	12	23	467	1,421	1,326	1,517	1,812	1,712	712	511	9,513	10,835
O6	17	20	336	1,096	1,285	919	1,475	945	412	926	7,431	8,464
O7	22	77	76	1,217	985	985	1,238	1,005	426	985	7,016	7,992
O8	63	41	39	712	45	549	670	683	399	670	3,871	4,410
O9	54	36	11	416	67	443	72	68	298	67	1,532	1,745
O10	39	29	54	215	124	355	753	125	54	15	1,763	2,008
Σ	464	824	4,190	10,511	10,537	8,869	9,590	7,654	3,222	4,094	59,956	
D _j	1,467	1,712	4,639	10,784	10,811	9,100	9,839	7,853	3,306	4,201		68,290



En principio se observa un incremento de viajes totales de 6.3 %, a continuación determinaremos la distribución de estos viajes en el corredor.

El primer paso para la solución de la demanda gravitatoria es encontrar el coeficiente β , su cálculo requiere transformar la matriz de viajes en matriz de costos, tal como se detallo en la página 20, aquí solo expondré los datos más relevantes en el proceso de cálculo.

En primer lugar se determina la matriz de costo de viaje, la cual esta expresada en minutos.

O/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
O1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
O2	20	10	20	30	40	50	60	70	80	90
O3	30	20	10	20	30	40	50	60	70	80
O4	40	30	20	10	20	30	40	50	60	70
O5	50	40	30	20	10	20	30	40	50	60
O6	60	50	40	30	20	10	20	30	40	50
O7	70	60	50	40	30	20	10	20	30	40
O8	80	70	60	50	40	30	20	10	20	30
O9	90	80	70	60	50	40	30	20	10	20
O10	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10

En donde:

$$c^* = 43.00$$

$$\beta_0 = 0.0233$$

Valores con los que se calcula la matriz de factores $e^{(-\beta c_{ij})}$.

O/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ
O1	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	0.00	1
O2	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	0.01	2
O3	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	0.01	2
O4	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	0.02	2
O5	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	0.04	2
O6	0.04	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	0.06	2
O7	0.02	0.04	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	0.11	2
O8	0.01	0.02	0.04	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	0.19	2
O9	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	0.33	2
O10	0.00	0.01	0.01	0.02	0.04	0.06	0.11	0.19	0.33	0.58	1
\square	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	

En donde se obtiene $T_{ij}/\Sigma = 3836$, el cual se usa para calcular la matriz base.



O/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ	O _i
O1	2,213	1,277	737	425	245	141	82	47	27	16	5,210	8,186
O2	1,277	2,213	1,277	737	425	245	141	82	47	27	6,472	3,960
O3	737	1,277	2,213	1,277	737	425	245	141	82	47	7,181	10,001
O4	425	737	1,277	2,213	1,277	737	425	245	141	82	7,559	10,689
O5	245	425	737	1,277	2,213	1,277	737	425	245	141	7,723	10,835
O6	141	245	425	737	1,277	2,213	1,277	737	425	245	7,723	8,464
O7	82	141	245	425	737	1,277	2,213	1,277	737	425	7,559	7,992
O8	47	82	141	245	425	737	1,277	2,213	1,277	737	7,181	4,410
O9	27	47	82	141	245	425	737	1,277	2,213	1,277	6,472	1,745
O10	16	27	47	82	141	245	425	737	1,277	2,213	5,210	2,008
Σ	5,210	6,472	7,181	7,559	7,723	7,723	7,559	7,181	6,472	5,210	68,290	
D _j	528	939	4,773	11,972	12,002	10,102	10,923	8,718	3,670	4,663		68,290

A partir de la cual se aplica el método de Furness, hasta obtener la matriz de distribución con la cual se calculo un $\beta = 0.0526$, a partir del cual se obtiene la matriz de origen destino, obtenida mediante el método gravitacional.

O/D	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	Σ	O _i	a _i
O1	374	418	1,271	2,120	1,482	919	750	488	176	188	8,186	8,186	1.00
O2	62	209	634	1,058	740	458	374	243	88	94	3,960	3,960	1.00
O3	55	184	1,679	2,799	1,957	1,213	990	644	232	249	10,001	10,001	1.00
O4	22	75	685	3,430	2,399	1,486	1,213	789	284	305	10,689	10,689	1.00
O5	10	34	313	1,570	3,299	2,044	1,669	1,086	391	419	10,835	10,835	1.00
O6	4	13	120	602	1,265	2,355	1,922	1,251	450	482	8,464	8,464	1.00
O7	2	6	58	288	606	1,127	2,765	1,799	647	694	7,992	7,992	1.00
O8	1	2	18	89	187	348	854	1,668	600	644	4,410	4,410	1.00
O9	0	0	4	22	47	88	216	422	456	489	1,745	1,745	1.00
O10	0	0	3	17	35	65	159	311	336	1,082	2,008	2,008	1.00
Σ	530	942	4,786	11,997	12,016	10,103	10,912	8,700	3,659	4,645	68,290		
D _j	528	939	4,773	11,972	12,002	10,102	10,923	8,718	3,670	4,663		68,290	
b _j	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00			

El impacto que tendrá la demanda en 10 años sobre el sistema Metrobús (si es que este continua monopolizando el corredor, sin modificar la oferta de transporte) se reflejara en la cantidad de autobuses y su frecuencia de paso, ya que simplemente al aumentar la demanda y mantenerse la capacidad por unidad, se requieren de mas unidades.



Aplicando el criterio de la sección 3.1.2, se observa que los intervalos de paso en cada región tienden a ser sumamente pequeños. Principalmente en las regiones Indios Verdes, y el tramo de Buenavista a Francia.

Designación	Región	Intervalo	Veh/Hr.
O1	Indios Verdes	1.5	41
O2	Circuito	3.0	20
O3	Buenavista	1.2	50
O4	Glorieta	1.1	53
O5	Chilpancingo	1.1	54
O6	Félix Cuevas	1.4	42
O7	Francia	1.5	40
O8	Dr. Gálvez	2.7	22
O9	Perisur	6.9	9
O10	El caminero	6.0	10

Figura. 3.21 Resumen de autobuses articulados necesarios para satisfacer la demanda en el corredor Insurgentes, se considera un factor de ocupación de 100%.

Es evidente que la vialidad se encuentra saturada, por lo cual con un incremento de la demanda de 16% como el calculado, (aun sin contar que la tasa de motorización aumente) se prevé una de velocidad menor, lo cual complica aún más la operación.

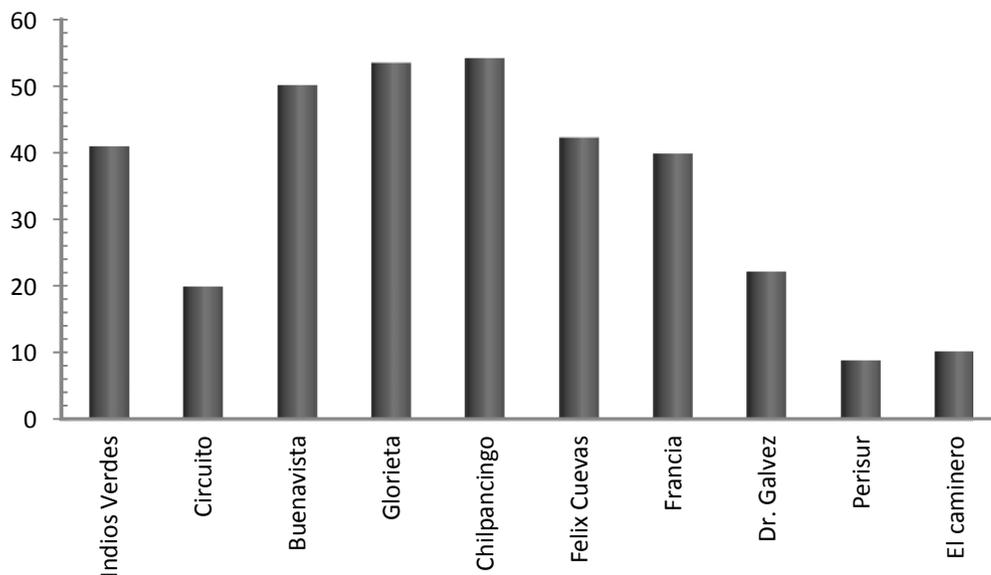


Figura. 3.22 Grafica de la ocupación en el corredor Insurgentes, en vehículos por hora. Estimada para el horizonte de 10 años.



Para corroborar esta afirmación, tomaremos en cuenta el tiempo que tarda un semáforo cualquiera, ubicado en el tramo crítico: Buenavista – Francia, este tiempo puede variar pero generalmente no resulta menor que 1.5 minutos, por otra parte el tiempo que utiliza el vehículo en aproximarse a la estación así como permitir el ascenso y descenso de pasajeros tampoco es menor a 45 segundos, por lo tanto parece sumamente complicado que el sistema satisfaga la demanda esperada.

Una demanda adicional de transporte se puede considerar; esta demanda, no gravita sustancialmente en el modelo utilizado en este mismo inciso, debido a la posición geográfica de las regiones que conecta; el Tren Suburbano línea Uno.

Originalmente este sistema se proyectó para brindar 300,000 viajes diarios, según cifras de su página de internet. Sin embargo, actualmente solo se registran 45,000 viajes en día normal. Este es el número de viajes que concurren al corredor Insurgentes, por medio del CETRAM Buenavista.

Mientras que la tarifa actual es considerada muy alta por los usuarios, año con año se ve crecimiento de la demanda. Este efecto es debido en gran parte a las condiciones económico-financieras de operación del sistema, razón por la que se prevé un decremento de la tarifa (en términos reales) en los próximos años, lo cual aumentará la demanda en los próximos 5 años, hasta el tope de proyecto fijado en 120 mil diarios para el CETRAM Buenavista.

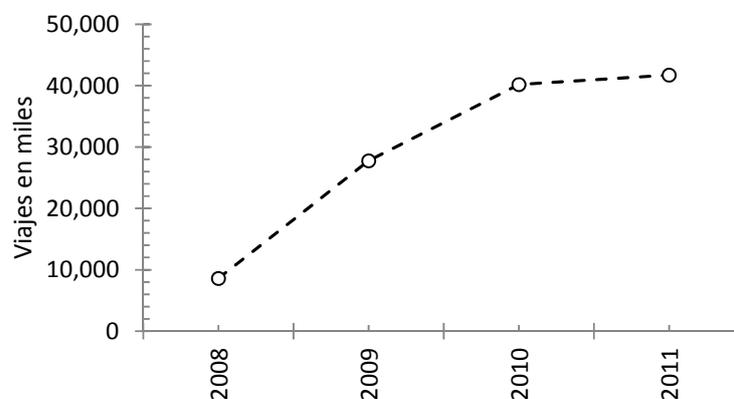


Figura 3.12 Gráfica del incremento de la demanda global en el Tren Suburbano línea 1.

La demanda actual de este sistema se consideró en la matriz analizada en este trabajo, sin embargo existe una demanda latente que está en espera de que baje el costo del sistema. En tanto, esa demanda se desplaza por corredores alternos al de Insurgentes. Principalmente periférico Boulevard Adolfo López Mateos, Av. Vallejo, Eje central, Marina Nacional y algunas otras. El mapa de la figura siguiente muestra la posición de estas vialidades con respecto al corredor Insurgentes.



“Negar un hecho es lo más fácil del mundo. Mucha gente lo hace, pero el hecho sigue siendo un hecho”.
Isaac Asimov (1920-1992).

CONCLUSIONES.

Con base en la investigación realizada y de acuerdo con los datos obtenidos, se concluye que: la Avenida Insurgentes es el eje longitudinal norte-sur de la ciudad de México, con una extensión de 28.7 km, recorre el Distrito Federal conectando dos de los cinco accesos a la Capital de la República, ubicado en el centro de la Zona Metropolitana del Valle de México, es la región de más alta concentración humana del distrito federal y una de las más grandes del mundo, está conformada por las 16 delegaciones políticas del D. F., y 32 municipios conurbados del estado de México.

Debido a su posición geográfica dentro de la Zona Metropolitana Del Valle de México, la Avenida Insurgentes, es uno de los corredores de transporte con mayor de manda, especialmente debido a que comunica la región más poblada del estado de México con Distrito Federal. En el corredor Insurgentes existen tres modos de transporte de pasajeros.

1. Vehículo privado.
2. Taxi.
3. Metrobús.

El flujo vehicular mantiene la avenida en uso constante durante las 24 hrs del día. En horas pico el flujo está compuesto, mayoritariamente, en un 70-80% por autos particulares, con un factor de ocupación de 1.9 pasajeros por vehículo.

La tremenda concentración de las actividades humanas en regiones específicas de la Avenida Insurgentes, ha generado un incremento la demanda de los servicios, para los que la geografía y la fisiografía de este sitio simplemente no tienen capacidad. Generando condiciones de hacinamiento, las cuales a su vez, presentan diversos conflictos que pueden ir de la simple incomodidad en el transporte público, hasta problemas económicos y sociales; particularmente de salud, seguridad, y otros; en cualquier caso la calidad de vida de los actores e involucrados con el corredor vial Insurgentes, se ve disminuida.

La respuesta a las interrogantes planteadas al final del capítulo anterior es compleja, el transporte urbano de pasajeros es un servicio que evidentemente refleja la calidad de vida en los habitantes de una ciudad, el Metrobús no escapa a esta definición, aun que por su puesto este es solo un aspecto del transporte urbano de pasajeros en el corredor. Y es este precisamente, el punto de partida para el establecimiento conclusiones específicas sobre el corredor Insurgentes:



- a. El sistema Metrobús monopoliza el transporte de pasajeros en el corredor.
- b. El sistema es insuficiente para satisfacer la demanda actual sus principales limitaciones son:
 - i. La falta de capacidad en las vías por las que transita, la cual está saturada. No hay espacio en la Avenida Insurgentes para más unidades del Metrobús o cualquier otro vehículo.
 - ii. Debido a la saturación de la vialidad, la velocidad del recorrido es baja.
 - iii. La falta de capacidad de sus vehículos, los cuales no satisfacen la demanda en horas pico.
- c. Las instalaciones del Metrobús son inadecuadas para el volumen de tránsito de pasajeros y vehículos.
- d. Existe falta de accesibilidad al servicio, ya que puede contabilizarse aproximadamente de 10 a 15 minutos en acceso y 10-15 minutos en salida, lo cual disminuye drásticamente el tiempo total de viaje.
- e. Actualmente la velocidad de desplazamiento del Metrobús es de 16-19 kmp, en horas pico y de 19-21 kmp, en horas valle, lo cual representa una ventaja frente al desplazamiento en vehículos privados: taxis y auto particular, sin embargo su accesibilidad, limita su eficiencia.
- f. En el horizonte de 10 años se espera el aumento de la demanda en más de un 15% con lo cual se complica aún más la operación de sistema Metrobús.
- g. El corredor requiere de sistemas de transportes alternativos con mayor capacidad y velocidad.

Es evidente a todas luces, que el problema en es el incremento de la población, así como su concentración, en regiones específicas, es un problema de población y territorio, que está asociada al desarrollo urbano y poblacional en la Zona Metropolitana de Valle de México, las políticas aplicadas en este aspecto simplemente no han logrado detener el deterioro en el nivel de vida de sus habitantes. Particularmente en el Estado de México, en donde la población se ha duplicado en los últimos 20 años, y se espera un incremento de 2.5 millones de habitantes en los próximos 10 años.



RECOMENDACIONES.

Si resulta apropiado generar sistemas de transporte más amplios, en vez de dar un giro drástico en la política económico – social y territorial de la Zona Metropolitana del Valle de México, entonces la solución es suministrar un sistema de transporte apropiado a las condiciones económico-sociales de dicha región. Se dice que los gastos asociados a este tipo de transporte no son costeados o que simplemente es muy costoso. Es necesario revisar con cuidado estas afirmaciones, mediante la realización de un estudio de costo beneficio, que al margen de intereses políticos, evalúe el beneficio económico-social de un buen sistema de transporte, es decir. Se requiere analizar más profundamente el impacto y la derrama económica per cápita, comparado con un sistema de transporte apropiado, con una tarifa justa, que lo haga sustentable. Afirmer que un buen sistema de transporte para la ciudad de México es incosteable sin subsidio, es afirmar que la capital no tiene ganancias macroeconómicas, ni suficiente ingreso per cápita para que la población sustente sus propios medios de transporte.

Ante la falta de posibilidades de ampliar la capacidad del sistema Metrobús, se recomienda ampliar la capacidad del corredor de transporte de pasajeros, mediante un sistema de transporte masivo mas grande, que paralelamente al sistema Metrobús satisfagan las necesidades de la población, principalmente la económicamente activa del Valle de México. Para ello se sugiere, un sistema nuevo, que separe los viajes según su destino. Generando viajes largos y rápidos, en contraste con el servicio que actualmente brinda el sistema Metrobús, que bien se puede seguir utilizando para viajes de menor tiempo y distancia.

Con la misma longitud que el sistema actual y menor número de estaciones el nuevo sistema podría acortar el tiempo de traslado del CETRAM Indios Verdes a la región central del corredor. Esto significaría que Metrobús tenga una menor demanda en viajes largos aumentado su nivel de servicio. Partiendo de la premisa de que limitar el uso del auto particular y estimular el uso del transporte público implica mejorar la oferta transporte masivo.

Finalmente, la implementación de un sistema de esta naturaleza debe ser evaluada con sumo cuidado a fin de minimizar las externalidades ambientales y sociales, así como maximizar los beneficios económicos. Para ello se requiere de más planeación urbana, la cual deberá aplicar políticas del uso del suelo más restrictivas, que no permitan el crecimiento vertical de las regiones críticas del corredor, situación que a mediano o largo plazo impliquen nuevamente una saturación de las vías de comunicación.



REFERENCIAS.

ón.

o

es

é,

ez

ly

ix

(