

Algoritmo para la asignación de vehículos del transporte urbano

MERCEDES RAMÍREZ RODRÍGUEZ*

Assignment algorithm for buses of urban transport

Abstract. *This study describes an algorithm for the problem of assigning buses to a large number of short trips in an urban area. This algorithm is based on supply and demand in the urban transport, with this approach we hope to optimize the urban transport system.*

Introducción

La planificación del transporte es sólo una parte del proceso de planificación de ciudades o regiones, pero es una parte importante. Casi todo lo que hacemos depende en mayor o menor medida del transporte.

La planificación analítica del transporte constituye un campo de estudio relativamente nuevo, que se ha desarrollado para tratar de predecir el tipo de distribución de viajes en áreas atendidas por diferentes sistemas de transporte. Las técnicas que se utilizan en la planificación analítica del transporte nos sirven para establecer criterios cuantitativos susceptibles de ser aplicados a diversos cursos de acción o a la evaluación de propuestas particulares sobre el transporte.

La planificación analítica del transporte no soluciona todos los problemas, pero cuando se aplica de manera apropiada y se interpreta adecuadamente, nos ayuda a inferir las consecuencias de los cursos de acción propuestos.

Este es un trabajo de planificación urbana eminentemente técnico y funcional; ha sido elaborado con base en la teoría de sistemas, porque pensamos que este enfoque permite aplicar el pensamiento analítico a los problemas del sistema espacial urbano de una forma más realista de lo que hasta ahora se ha venido realizando.

El objetivo principal es desarrollar un algoritmo para optimar el aprovechamiento de los autobuses del transporte urbano. El algoritmo está basado en un estudio sobre la oferta y demanda de esa clase de transporte.

I. La necesidad de planificar el transporte

La necesidad de planificar el transporte es evidente: día y noche la gente realiza una serie de actividades como trabajar, ir de compras o gozar del tiempo libre; para llevar a cabo tales actividades frecuentemente se ve obligada a recorrer largas distancias. Muchas de estas operaciones dependen del transporte, y los problemas de traslado son particularmente acuciantes donde existe un rápido crecimiento poblacional.

Si existiera alguna duda sobre la necesidad de planificar el transporte, de cualquier modo son mucho más profundas las incógnitas que existen sobre la validez de los modelos que se usan para este fin. En este trabajo haremos algunas referencias a las técnicas cuantitativas aplicables por el planificador del transporte, muchas de las cuales son relativamente nuevas.

Con esas técnicas no se espera encontrar la solución universal al problema del transporte. Aspiramos, sin embargo, a dar algunas indicaciones acerca de lo que puede lograrse mediante el uso de estas técnicas de planeación, para ayudar a los planificadores y administradores a determinar qué decisiones y políticas pueden tomarse con la ayuda de algún modelo de transporte y cuáles pueden ser tomadas con la ayuda de análisis menos formales.

II. Breve resumen de la construcción de modelos

La construcción de modelos es la parte más importante de la planificación del transporte. El modelo de transporte se divide convencionalmente en tres etapas.

a) Generación de viajes. Consiste en un examen de las relaciones entre el número de viajes realizados y un cierto número de parámetros cuantificables.



* Facultad de Planeación Urbana y Regional, UAEM.

b) Distribución de viajes. El paso siguiente es establecer la relación entre estos viajes, su origen y destino geográfico, y los medios de transporte disponibles.

c) La asignación. Es el proceso mediante el cual se determina la ruta que seguirá un individuo que se desplaza entre dos zonas. Comúnmente está aceptado que la ruta de un viaje entre dos zonas vendrá determinada, para una red dada, por el recorrido que minimice el tiempo o el costo del desplazamiento. Actualmente se han desarrollado avanzados programas que calculan las rutas de mínimo costo o mínimo tiempo, y se han introducido técnicas de asignación *multipath*, que asocian diferentes porcentajes del total de viajes entre dos zonas a cada una de las posibles rutas alternativas.

Estas tres etapas se tratan de modo independiente, aunque en la práctica se encuentran relacionadas.

III. Antecedentes de trabajos sobre asignación en otros países

La asignación del transporte es una tarea difícil porque en ella se debe tomar en cuenta la variación en los niveles de servicio durante el día, el número de autobuses, el número de conductores, los cambios en la demanda durante las temporadas escolares, días festivos y periodos vocacionales, también se debe tomar en cuenta, la frecuencia de los vehículos, tiempo del recorrido y el kilometraje de cada viaje.

Durante los últimos diez años los países desarrollados han realizado estudios de programación y asignación de autobuses, a continuación mencionaremos algunos.

1. Sistema Hastus

En febrero de 1990, la Sociedad de Transporte de la Comunidad Urbana de Montreal (STCUM), una de las diez más grandes compañías de transporte público en Norteamérica, presentó el desarrollo de un pa-

quete de programación llamado Hastus, el cual utiliza métodos de programación lineal para calcular itinerarios óptimos de vehículos y programación de conductores.

El sistema Hastus ha generado ahorros anuales por más de tres millones de dólares (tres por ciento de los costos de operación), reportados en programación manual; más un millón de dólares economizados en la programación de vehículos. Este éxito de la STCUM, ha permitido su aplicación en 40 grandes ciudades del mundo.

Este sistema propone cuatro bloques de asignación para días normales, para los sábados, para los domingos y para días festivos.

2. Sistema Busman

Busman es un sistema de paquetes de computación que ha sido desarrollado refinado y vendido en los últimos cuatro años por la Universidad de Leeds, en Inglaterra, y la compañía Nooton Jeffreys. Esta asociación fue establecida recientemente en Rockville, Maryland, en Estados Unidos. La experiencia conseguida ha dado como resultado una amplia y variada gama de aplicaciones.

Busman está basado en el trabajo de Tony Wren, Barbara Smith y Margaret Parker, investigadores de la universidad de Leeds; este equipo ha involucrado por años a numerosas organizaciones de transporte con amplias bases reconocidas mundialmente en el desarrollo de algoritmos, técnicas de programación y computación, los cuales han mejorado la eficiencia de vehículos y personal.

Busman posee un menú de conducción en línea correspondiente a un sistema de computación interactivo para compañías de transporte, que propone cuatro módulos de programación para minimizar costos (cuadro 1).

Aunque los sistemas Hastus y Busman fueron elaborados para otra cultura y nivel de desarrollo, pueden ser aprovechados en la planificación del transporte de nuestras ciudades.

Sin embargo, es necesario que el problema de asignación de transporte lo resuelvan equipos multidisciplinarios donde participen economistas, ingenieros del transporte, urbanistas, sociólogos, geógrafos e ingenieros en computación, entre otros especialistas que puedan transformar la tecnología existente para adecuarla a las necesidades concretas de las ciudades mexicanas.

La intención de este trabajo es, precisamente, aportar elementos que ayuden a reparar la carencia de técnicas y métodos de asignación de transporte en nuestro país.

CUADRO 1

MENÚ DE CONDUCCIÓN DE LÍNEA BUSMAN

OPERACIONES	PLANEACIÓN
- PROGRAMACIÓN DE VEHÍCULOS - PROGRAMACIÓN DE USUARIOS Y TRIPULACIÓN - OPTIMIZACIÓN DE VEHÍCULOS - PROGRAMACIÓN DE HORARIOS	- CALENDARIZACIÓN DE VÍAS - CONSTRUCCIÓN DE REDES DE TRANSPORTE - RUTAS EXPRESS - FLUJOS DE LAS RUTAS
MERCADOTECNIA	ADMINISTRACIÓN
- DIFUSIÓN DE LAS RUTAS. - SEÑALIZACIÓN DE PARADAS E IDENTIFICACIÓN DE CADA RUTA	PROGRAMAS OPERATIVOS EN EL ASPECTO DE LA CONTABILIDAD

IV. Asignación

El objetivo de la fase de asignación de un modelo de transporte es el de simular la elección de la ruta. En esta fase se pueden considerar dos partes:

- a) La determinación de las rutas individuales.
- b) La integración en los recorridos seleccionados.

Puede suponerse que la persona que viaja selecciona su ruta para minimizar los costos del viaje. Se puede tratar de costos en dinero y costos menos tangibles. La hipótesis básica en todos los procedimientos de asignación es que todos los viajes tienen origen y destino en los centroides de zona, y que la elección individual de una ruta en particular se realiza en función de varios parámetros asociados a los costos de viaje.

Recientemente se han establecido los métodos de asignación que describimos a continuación.

1. Asignación por el método de *todo o nada*

Se dice que se ha realizado una asignación "todo o nada" cuando se han asignado todos los viajes entre dos zonas o los distintos tramos, formando los recorridos de tiempo mínimo entre los dos centroides de zona, y cuando este procedimiento se ha repetido para todos los pares de zonas involucradas.

La experiencia ha demostrado que la técnica de todo o nada conduce a asignaciones que se quedan cortas. Cuando dos o más tramos o carreteras están juntos y aproximadamente en la misma dirección, se considera que uno de ellos es el más rápido, y se estimará que todos los viajes pasan por él.

Conviene mencionar que las asignaciones de "todo o nada" proporcionan resultados poco fiables. Para superar algunas de estas dificultades se han mejorado las técnicas de asignación. Un procedimiento de asignación que supera la técnica de todo o nada consiste en utilizar las curvas de diversificación, que es un método de asignación proporcional.

2. Asignación mediante curvas de diversificación

En principio, se supone que para cualquier intercambio entre zonas existen al menos dos rutas, que cada una de ellas tiene sus propias características de distancia, tiempo, velocidad y nivel de servicio, y que el conductor elige luego de evaluar estas características.

Las curvas de diversificación son relaciones empíricas construidas a partir de los datos recogidos en encuestas sobre el uso de las distintas rutas; se puede estudiar el tiempo empleado en el desplazamiento por la ruta A al comparársele con el tiempo que se

SIN TÍTULO

requiere para desplazarse por la ruta B; también se puede comparar las proporciones de usuarios que utilizan ambas rutas.

En la asignación mediante curvas de diversificación se consideran sólo dos rutas alternativas entre cada par de zonas, pero en una red urbana compleja, y más aún en el caso de viajes largos, siempre existirán más de dos rutas utilizables.

3. Asignación proporcional a varias rutas

En un área urbana amplia se pueden elegir varias rutas para efectuar los desplazamientos entre cada par de zonas. La ruta más utilizada será probablemente la de costo mínimo o tiempo mínimo, pero se realizarán muchos viajes por rutas más largas o aparentemente más caras. Esto puede suceder por dos razones.

a) Desconocimiento (no todo el que viaja tiene suficientes elementos de juicio para decidir cuál es la ruta más conveniente).

b) El efecto de la localización dentro de la zona (en realidad los viajes comienzan desde diferentes puntos, y la ruta más apropiada desde el centroide de la zona no tiene por qué ser la más apropiada desde sus demás puntos).

Se ha comprobado sobre una red actual que los resultados de este modelo han sido satisfactorios, y aunque parezca que la ruta seleccionada para cada viaje en particular es arbitraria, en el sentido de que viene determinada por el azar, las asignaciones totales de tráfico a cada tramo son más exactas que en los métodos anteriores.

Las asignaciones obtenidas con este modelo dependen de las hipótesis adelantadas sobre la máxima variación permitida (grado de aleatoriedad).

4. Asignación en los transportes públicos

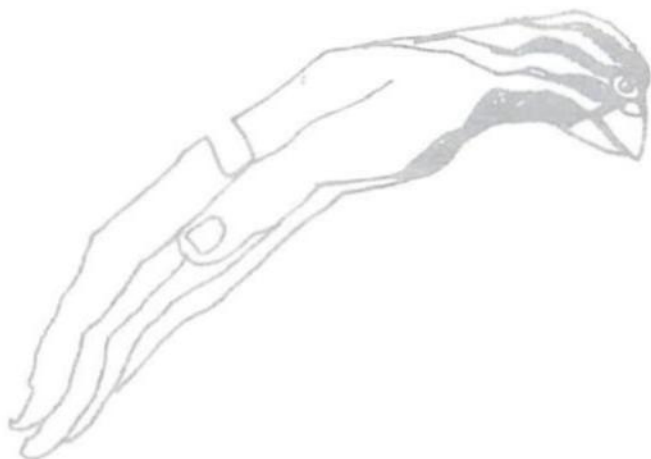
Las redes de transporte público difieren fundamentalmente de las redes de carreteras, puesto que comprenden un sistema de servicio fijo, con rutas determinadas y generalmente a intervalos regulares. El procedimiento de asignación establecido para estas redes sigue los mismos principios y así el tráfico entre zonas se realizará por la ruta más rápida o más barata. Esta técnica incluye:

- Duración del recorrido
- Tiempo de espera en los puntos de transbordos
- Tiempo empleado andando.

Buena parte de la información necesaria sobre las redes se obtiene de los controladores de los servicios. Los tiempos de espera se obtienen de intervalos teóricos fijados entre las salidas de dos servicios consecutivos, y la mitad de este intervalo. Para servicios de alta frecuencia se puede tomar un valor seleccionado al azar, entre esos dos extremos o para servicios de baja frecuencia, se puede tomar el valor mitad del intervalo fijado entre dos servicios consecutivos. Otra cuestión relacionada con las funciones que definen los tiempos de espera es que existe un tiempo máximo más allá del cual el público no espera por el servicio. Este aspecto debe tomarse en cuenta dando un tiempo de espera considerable. Y este tiempo depende del tipo de servicio que se esté dando.

V. Algoritmo de selección de una ruta de transporte público

El ejemplo del algoritmo siguiente ilustra los principios más importantes de la asignación del transporte público. El cálculo de las rutas se puede hacer en una serie de pasos muy simple, reflejando la complejidad de la red en el número de pasos necesarios. El primer paso consiste en seleccionar el primer nodo y, una vez hecho esto, calcular las rutas que desde ese nodo se dirigen hacia los demás destinos de la red.



Para cada nodo se detalla cierta información, esta información suele estar compuesta de:

1. Número de nodos.
2. Tiempo empleado en alcanzar el nodo.
3. Número de nodos para alcanzar el nodo.
4. Servicio en el que se llega.
5. Nodo en el que se tomó el servicio de transporte.
6. Un indicador que puede ser 0 ó +.

Con este método se pueden aplicar asignaciones del tipo todo o nada, las ventajas de la utilización de técnicas de asignación a varias rutas permite su aplicación a los modelos de elección de ruta en transportes públicos, aunque existen pocas áreas urbanas en las que la red de transportes públicos sea lo suficientemente compleja como para justificar el elevado costo de los métodos de asignación a varias rutas.

Las investigaciones y las experiencias realizadas y avaladas en otros países han posibilitado la formalización no sólo de modelos y técnicas del transporte, sino de todo el proceso de planificación del transporte urbano. A continuación describiremos el algoritmo de manera general.

Este trabajo es un modelo o técnica para la estructura urbana; virtualmente, los modelos de la estructura urbana tienen una característica común y es la de suponer un cierto grado de orden en el comportamiento físico espacial.

En otros países existe una amplia literatura sobre modelos analíticos para optimar el sistema de transporte público; sin embargo, la mayoría de estos trabajos son demasiado complejos, pero lo más destacable de los modelos analíticos en cuanto al campo de la planeación se refiere es que actualmente se ha desarrollado una mayor capacidad analítica en los planificadores de nuestro país.

Este algoritmo fue resuelto analíticamente de una manera simplificada para que su aplicación no fuera limitada; el algoritmo fue hecho para un sistema espacial urbano, en donde existe una red de transporte con problemas de horarios y asignación de autobuses, además de un gran número de viajes.

Algoritmo

Se define como un método de cálculo, o como un proceso de reglas específicas para dar solución a un problema, un algoritmo está constituido por variables, parámetros y relaciones estructurales.

La estructura del algoritmo desarrollado en este trabajo está basado en un estudio real de las variables oferta y demanda, así como en algunos parámetros que fueron identificados en una encuesta con los usuarios y gerentes de las empresas, una vez definidos las variables y los parámetros. La parte más importante son las relaciones estructurales.

La estructura propuesta en este trabajo es muy simple, lo cual nos permita tener una interpretación individual de las rutas, así como la interpretación general de las empresas del transporte urbano.

El algoritmo va demostrando paso a paso el desarrollo del proceso de la metodología y la manera con que se les otorga a cada uno de los parámetros una función mediante fórmulas muy simples.

Idea general del procedimiento

1. Proponer los parámetros para asignar el número de vehículos de cada ruta.
2. Expresar con detalle las fórmulas para calcular los parámetros.
3. Determinar un objetivo, una norma y una meta para cada uno de los parámetros.
4. Sumar los valores obtenidos de cada parámetro con base en los criterios, objetivos, normas y metas propuestos. Esta suma nos permitirá tener una calificación para cada ruta y, posteriormente, clasificarlas.
5. Establecer un criterio para la clasificación de rutas.
6. Establecer normas para asignar el número de vehículos a cada ruta.
7. Una vez clasificadas las rutas, se les comparará con las normas de asignación y esto nos permitirá detectar el déficit o superávit de vehículos en cada derrotero.
8. Asignar el número de vehículos con base en las normas propuestas.
9. Una vez asignado el número de vehículos en cada ruta, se planteará un esquema geométrico, con derroteros simétricos, cuyo objetivo será incrementar la capacidad de movimiento del servicio del transporte urbano.

Propuesta de los parámetros

Los parámetros utilizados en la construcción del algoritmo deberían obtenerse directamente de la estadística, y ser elegidos cuidadosamente para que representen grupos homogéneos de personas. La elección de parámetros es crítica, ya que determina la escala requerida y, por tanto, el tamaño, alcance y detalle de la recopilación de datos.

Para identificar estos parámetros se llevó a cabo una encuesta de oferta y demanda dentro de los autobuses urbanos de la ciudad de Toluca, Estado de México, elaborada por expertos en economía que han realizado estudios de oferta y demanda. Los parámetros sugeridos son los siguientes:

Oferta: es la cantidad de autobuses que una empresa pone a disposición de los usuarios para realizar un viaje.

Demanda: es la cantidad de autobuses que requieren los usuarios para realizar un viaje.

Distribución de la demanda: es la localización de los puntos donde los usuarios llegan o esperan el autobús para realizar un viaje.

Longitud de la ruta: es la cantidad de kilómetros que recorre un autobús durante un viaje.

Numero de paradas: es el número de veces que se detiene un autobús durante el recorrido de un viaje.

Frecuencia de la ruta: es la cantidad de tiempo que tardan en pasar consecutivamente dos autobuses.

Fórmulas para calcular los parámetros

Oferta: se calculará sumando el número de autobuses por día en cada ruta, y la fórmula es la siguiente:

$$O = \sum A \times R \quad (1)$$

Donde:

O = oferta

$\sum A \times R$ = suma de los autobuses por ruta.

Demanda: se calculará sumando el número de asientos que tiene un autobús, así como su máxima capacidad de espacio.

$$D = \sum U \times A \times R \quad (2)$$

Donde:

D = demanda

$\sum U \times A \times R$ = suma del número de asientos por autobús por ruta.

Distribución de la demanda: se calculará sumando el número de usuarios que llegan o esperan el autobús en la parada.

$$DD = \sum nu \quad (3)$$

Donde:

DD = distribución de la demanda

$\sum nu$ = suma del número de usuarios.

Longitud de la ruta: se calculará sumando la distancia en kilómetros que existe desde el origen de la ruta hasta su destino.

$$LR = D = \sum km \quad (4)$$

LR = longitud de la ruta

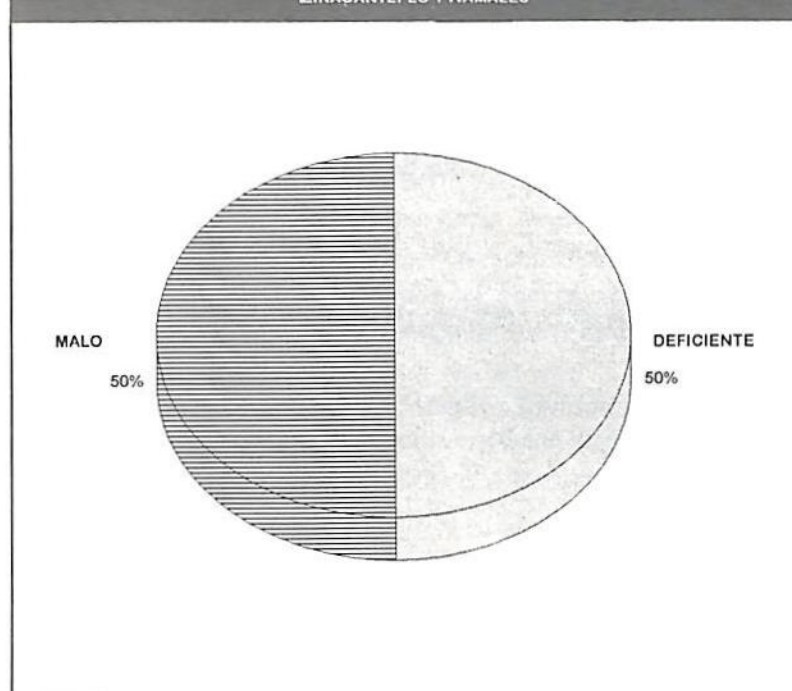
D = distancia

$\sum km$ = suma de kilómetros.

CUADRO 2

EMPRESA	NÚMERO DE AUTOBUSES	AUTOBUSES DEFICIENTES	AUTOBUSES QUE DEBE TENER LA EMPRESA
URBANOS Y SUBURBANOS ZINACANTEPEC	113	49	64
URBANOS Y SUBURBANOS XINANTECATL	142	33	109
URBANOS Y SUBURBANOS DE TOLUCA	228	113	115
ADOLFO LÓPEZ MATEOS	148	60	88
AUTOBUSES 2 DE MARZO	278	111	167
AUTOBUSES TOLLITZIN	78	34	44

GRÁFICA 1. AUTOBUSES URBANOS Y SUBURBANOS ZINACANTEPEC Y RAMALES



Número de paradas: se calculará sumando el número de veces que se detiene un autobús en el recorrido de un viaje.

$$NP = \sum NPA \quad (5)$$

Donde:

NP = número de paradas

$\sum NPA$ = suma del número de veces que se detiene un autobús.

Frecuencia de la ruta: se calculará sumando el tiempo en minutos que transcurren entre dos llegadas consecutivas de un autobús a una misma parada.

$$FR = \sum TE \quad (6)$$

Donde:

FR = frecuencia de la ruta

$\sum TE$ = suma del tiempo entre dos autobuses

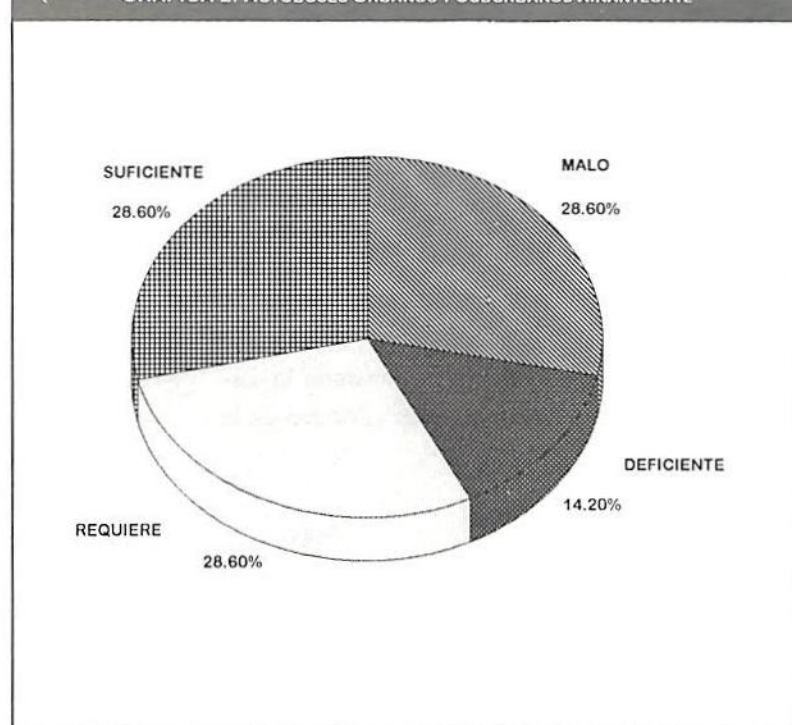
VI. Resultados de la aplicación del algoritmo

Para el desarrollo y aplicación del algoritmo, se tomaron las rutas de seis líneas de autobuses del transporte urbano de la ciudad de Toluca, con los resultados que se muestran en el cuadro 2. Estos resultados son indicativos y permiten definir la asignación de unidades para cada línea de acuerdo a su ruta: para el caso de Autobuses urbanos y suburbanos Zinacantepec y ramales, se asignaron 100%. Autobuses urbanos y suburbanos Xinantecatl, 75%, urbanos y suburbanos de Toluca, 50%; Autobuses Adolfo López Mateos, 50%; Autobuses 2 de marzo, 50% y Autobuses Tollotzin, 75% (ver gráficas).

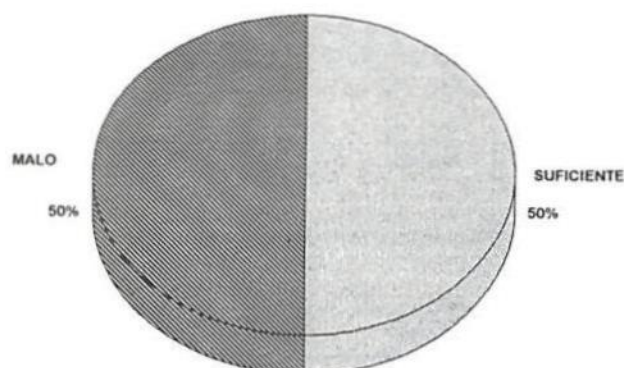
Existe una evidente necesidad de desarrollar actividades analíticas y utilizar cantidades mayores de datos mejor organizados, para que los modelos puedan alcanzar su etapa final, es necesario disponer de información relativa de las relaciones entre los elementos que constituyen el sistema espacial urbano.

Como consecuencia de este trabajo, debe quedar claro que los beneficios que supondrá para nuestras

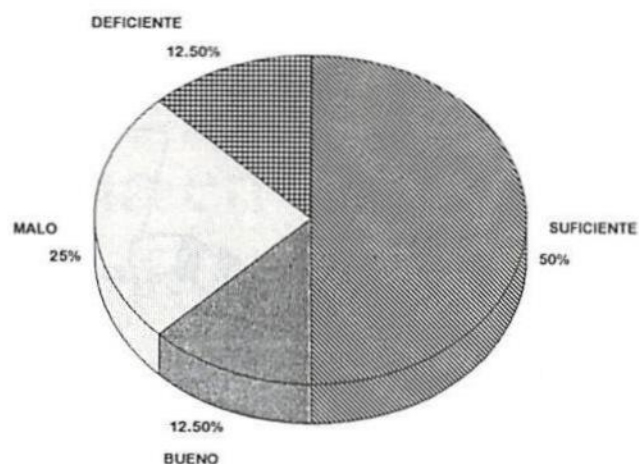
GRÁFICA 2. AUTOBUSES URBANOS Y SUBURBANOS XINANTECATL



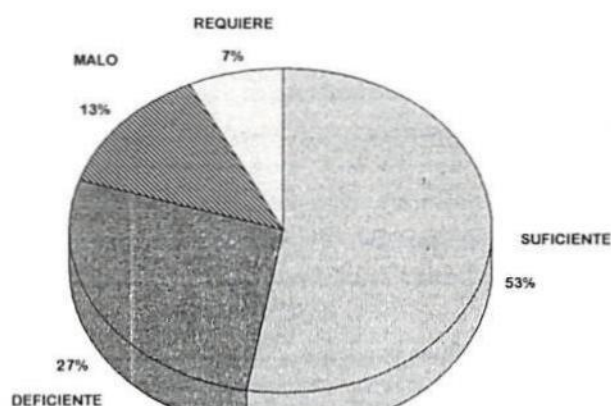
GRÁFICA 3. AUTOBUSES URBANOS Y SUBURBANOS DE TOLUCA



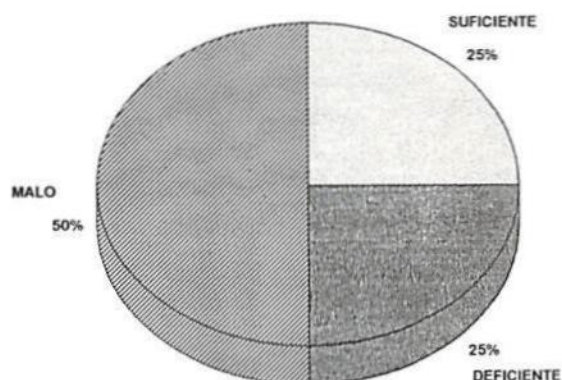
GRÁFICA 4. AUTOBUSES ADOLFO LÓPEZ MATEOS



GRÁFICA 5. AUTOBUSES 2 DE MARZO



GRÁFICA 6. AUTOBUSES TOLLITZIN



comunidades el desarrollo de los modelos serán enormes. El trabajo descrito en los puntos anteriores representa un esfuerzo dirigido a la resolución del problema de la elaboración de modelo de la estructura urbana, podemos decir que aún queda mucho por hacer en este campo que actualmente se encuentra prácticamente en su inicio.

El enfoque de la planeación desde el punto de vista de la teoría de sistemas permitirá la aplicación del pensamiento analítico a los problemas del sistema espacial urbano de una forma probablemente más realista de lo que hasta ahora se ha venido realizando. Las nuevas técnicas ayudarán a los urbanistas en su tarea, pero éstos deberán adquirir nuevos conocimientos para poder realizar adecuadamente las nuevas herramientas proporcionadas por la tec-

nología moderna que hoy en día, rebasa las posibilidades de la planeación tradicional. ♦

BIBLIOGRAFÍA

- Rosseau, J.
 _____ (1985). *Computer scheduling of public transport 2*. Rosseau J. M. Gleservier exigency publisher. B.V. (North. Holland).
 _____ (1990). "The Hastus vehicle and manpower scheduling system at the society of transport of the commundante urbanize of Montreal", en *Interfaces* 20-1, enero-febrero.
 Stever, R. (s/f). "And interactive multiple objective linear programming approach to a problem in forest management operations".
 Wang, H. y Masud (1973). *Mathematical programming with multiple objectives*. Computers and operations reset.
 Zeleny, M. (1978). *Multiple criteria decision making*, Mc Graw Hill. New York.