

En este capítulo se profundiza en la primera etapa del proceso de Planificación del Transporte Público, el diseño de la Red de Líneas. El objetivo principal es revelar las características de la movilidad de los usuarios del sistema de transporte, con vista a conocer los parámetros de ésta para, posteriormente, utilizarlos como una herramienta en beneficio del usuario. Herramienta que permitirá diseñar, planificar y gestionar de forma más optimizada con los recursos existentes. Los datos de movilidad capturados por una encuesta son una fuente de información ingente y rica, pero presentan el grave inconveniente de su difícil manipulación y utilización práctica. De aquí que resulte de interés el extraer modelos que puedan reproducir todos o parte de los datos capturados por el proceso de toma de datos. A esta labor se le conoce con el nombre de modelización de la movilidad.

5. Diseño de la red de líneas

“El gran desafío del analista o planificador de transporte es entregar a quien debe tomar las decisiones, toda la información necesaria para intervenir en las complejas relaciones que se dan entre el sistema de transporte y su entorno, con el objetivo de usar el transporte en forma efectiva, coordinadamente con otras acciones públicas y privadas, para alcanzar los objetivos de la sociedad”. (M.L. Manheim)

5.1. Movilidad

La movilidad de personas no es un fin en sí misma, sino que es una actividad derivada, consecuencia de las actividades socioeconómicas que realizan las personas. Se puede definir como el conjunto de desplazamientos de personas o mercancías en un período de tiempo determinado y en un ámbito espacial, caracterizado por una actividad socioeconómica, una estructura urbana y un sistema de transportes.

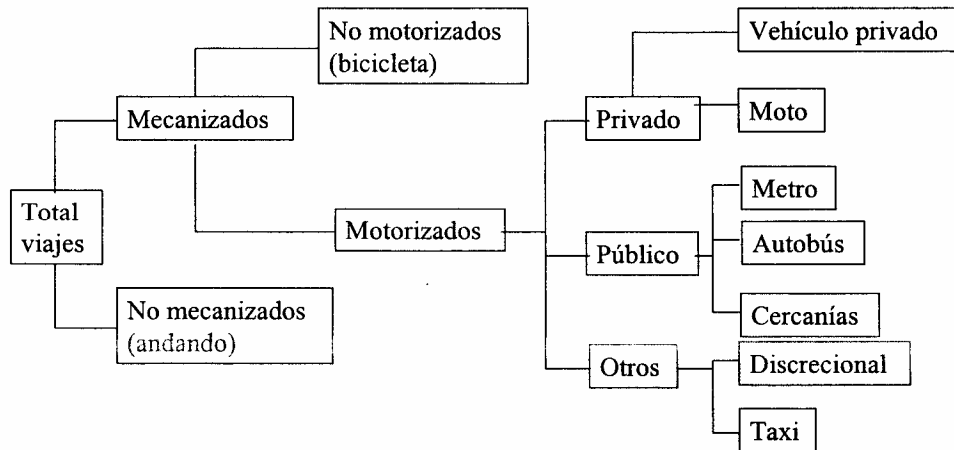


Figura 5.1 Movilidad por modo de transporte.

Del concepto de movilidad se pueden deducir las siguientes características:

- La movilidad tiene como unidad fundamental el viaje o desplazamiento.
- Posee una relación estrecha con el espacio.
- Se refiere a las actividades desarrolladas por los individuos. Refleja la importancia de los usos del suelo y los motivos de viaje.
- La componente temporal es también muy acusada (hora, día, semanal, etc.)
- Las variables explicativas de la movilidad (las que definen el contexto socioeconómico y de actividad de la movilidad: población residente, familias, estructura familiar, población activa, tasa de motorización, renta, accesibilidad, plazas escolares...) son las que van a permitir definir los modelos.

5.2. Etapas del Diseño y la Planificación de la Red de Líneas

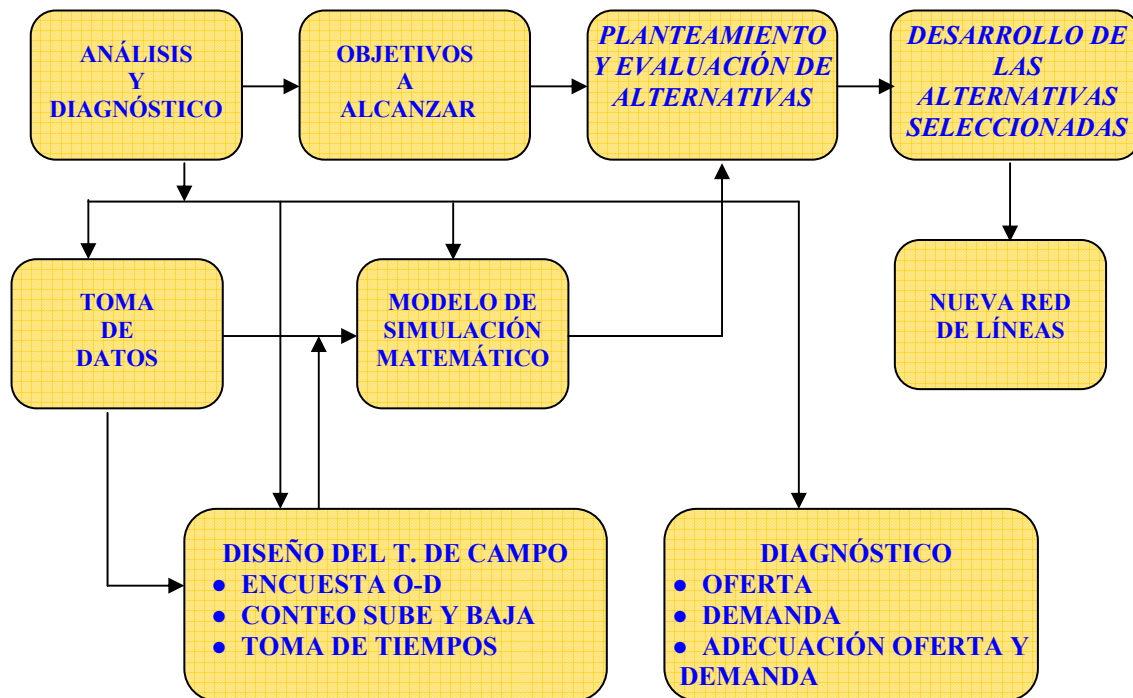


Figura 5.2 - Etapas del Diseño y la Planificación de la Red de Líneas

Básicamente se puede resumir en tres, las etapas del diseño de red de líneas:

1. Análisis de la situación existente.
2. Modelización.
3. Evaluación de alternativas.

5.3. Análisis de la situación existente

5.3.1. La zonificación

En primer lugar hay que proceder a la **zonificación**, es decir, a delimitar el área de estudio.

La multiplicidad de puntos origen y destino en un área urbana, hace necesaria la simplificación, por medio de la agrupación de los viajes, en la llamada zona de transporte.

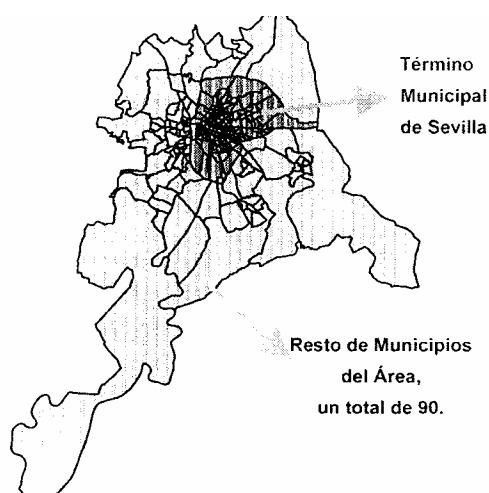


Figura 5.3 Plano de la zonificación del Área Metropolitana de Sevilla.

La zona de transporte es la unidad espacial en que se divide el territorio, a la cual se van a referir los viajes, así como el territorio. La definición de las zonas de transporte exige un conocimiento muy profundo del territorio, por medio de seccionado censal, planes generales, inventario de equipamientos, bases de datos de localización de empleo, etc.

Las zonas tienen que tener un tamaño suficientemente pequeño para que puedan ser representadas por un punto, centroide.

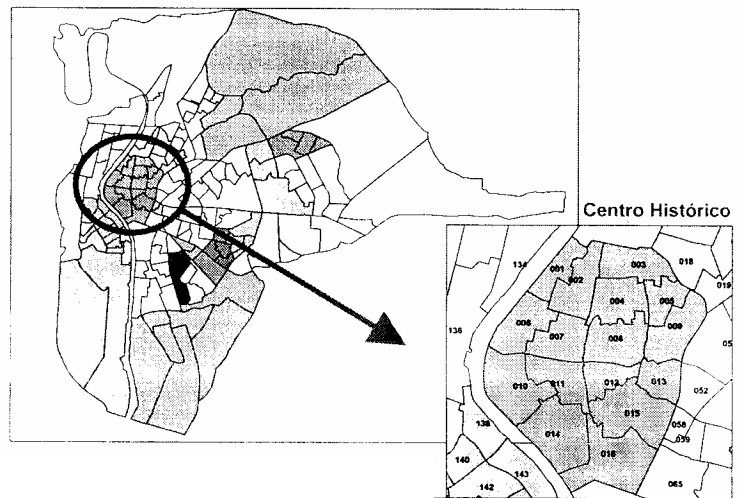


Figura 5.4. Plano de la zonificación de Sevilla

La zonificación debe poder agruparse en diferentes niveles de macrozonas, y tener en cuenta unos criterios generales:

- Las zonas deben ser homogéneas, en cuanto al uso del suelo (residencial, industrial, oficinas, comercial, equipamientos) y/o composición de la población (vivienda unifamiliar y multifamiliar, etc.) y a la movilidad.
- Se deben delimitar de acuerdo con las redes de transporte y con la existencia de barreras físicas (ríos, ferrocarriles, autovías, etc.)¹.
- Debe ser compatible con otras zonificaciones existentes: barrios, secciones censales, etc.

5.3.2. Recogida de información

Esta etapa implica la recopilación de los datos necesarios, ya existentes en la administración o específicamente capturados y/o desarrollados en otras fases previas de este estudio, útiles para las distintas etapas del trabajo. Entre ellas cabe citar:

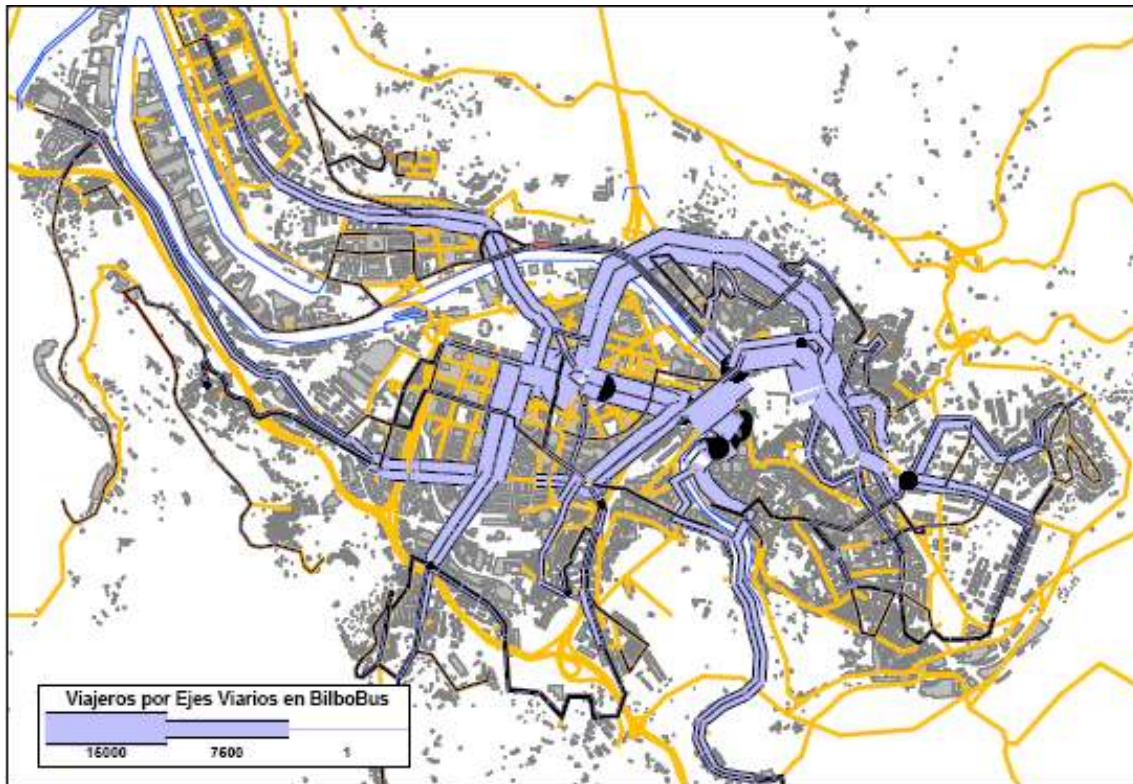


Figura 5.5 Representación de viajeros por ejes viarios. Ejemplo Bilbao.

- Datos de la red de transporte público actual: itinerarios, paradas, frecuencias, tiempos de recorrido, capacidades de vehículos, horarios, viajeros transportados por tramos, conteos de subidos y bajados.
- Datos de la red viaria actual, leyendo: cartografía, capacidades de tramos, direcciones permitidas y prohibidas, giros permitidos y prohibidos, velocidades medias en tramos, número de carriles, modos de transporte permitidos por cada carril y tramo.
- Datos de intensidades en puntos aforados: aforos automáticos, proporciones por tipos de vehículos (turismos, motos, pesados).
- Datos de la toma de datos para la determinación y caracterización de la movilidad en la aglomeración urbana. Incluyendo: zonificación utilizada, elevadores estadísticos, matrices de viajes directas y expandidas por modos de transporte, elección modal y características de los individuos que realizan viajes mecanizados.

- Datos del INE y del Padrón actualizados: datos socioeconómicos y geográficos.
- Otros datos socioeconómicos.

La forma más común de medir la movilidad es a través de encuestas. El objetivo es conocer cómo se mueven las personas dentro del área de estudio, a fin de estimar la movilidad. Se pueden distinguir los siguientes tipos de encuestas:

- Encuestas domiciliarias de movilidad.
- Encuestas pantalla y cordón. Generalmente realizadas a vehículos privados.
- Encuestas a bordo o en parada, en transporte público.
- Encuestas de diario de viaje.
- Encuestas telefónicas, autoadministradas, de calidad, etc.

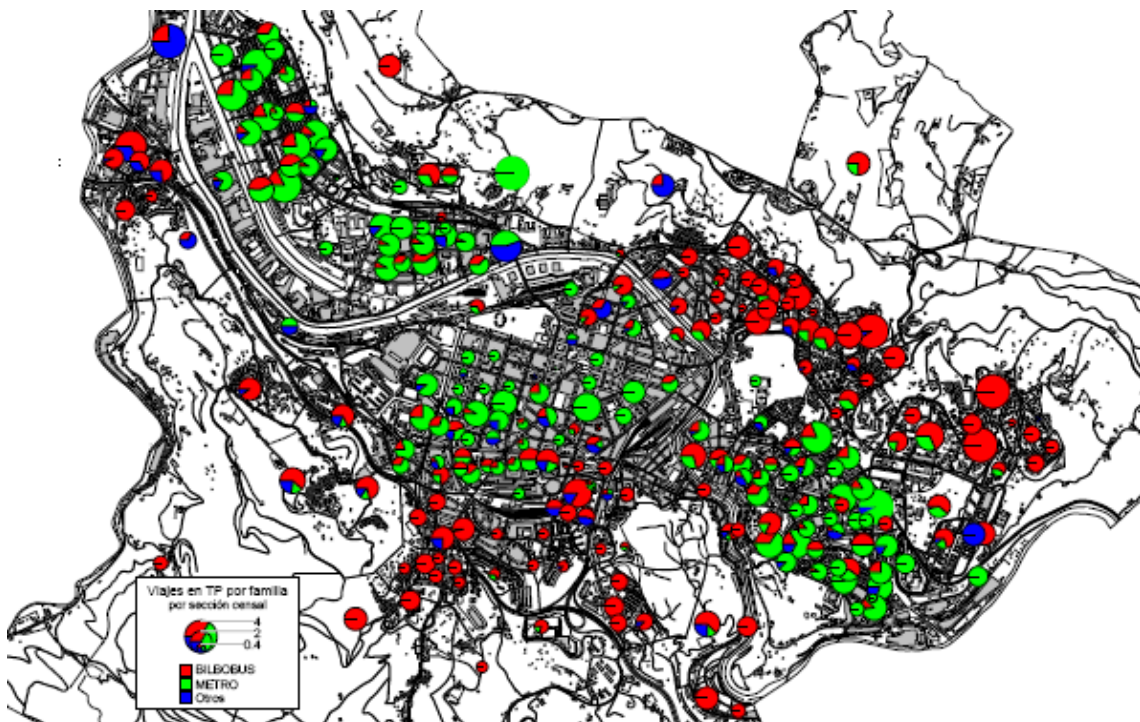


Figura 5.6 Representación de la información recogida. Ejemplo Bilbao.

Toda encuesta recoge una muestra de población que requiere ser expandida con cuidado para poder informar sobre esa población.

Las encuestas domiciliarias son las más completas para medir la movilidad, y las más caras. Se recoge información sobre los viajes que han realizado los miembros de una familia (mayores de cinco años), durante un día, o una semana determinada (motivo del viaje, modos de transporte, coste del viaje...). Así mismo, se suele recoger información socioeconómica sobre la familia (lugares de trabajo y estudios, renta, vehículos propios...)

Los conteos de suben y bajan dan información de la red actual:

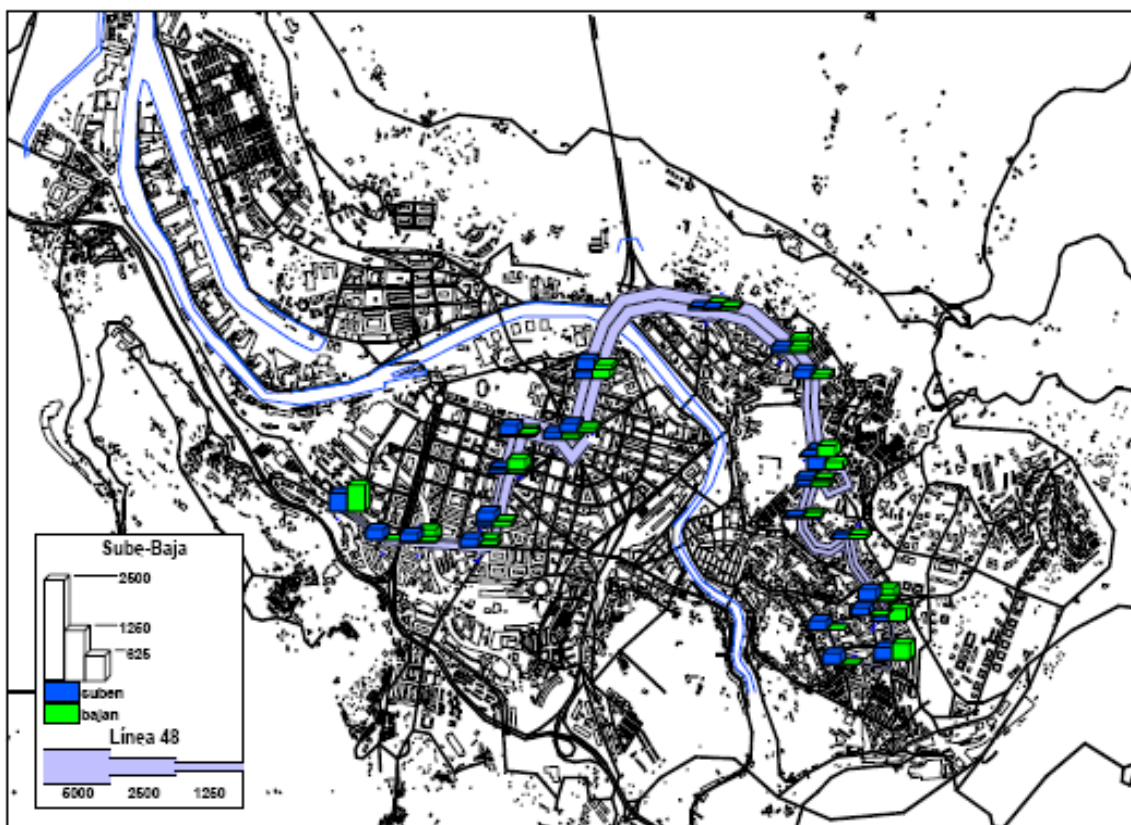


Figura 5.7 Representación suben y bajan. Ejemplo Bilbao.

Finalizadas las encuestas hay que preparar los datos capturados para su posterior utilización en el proceso modelización. Este proceso exige tres actividades:

- Codificación: traducir a datos numéricos la información.
- Cálculo de los coeficientes de expansión: coeficientes de paso de la muestra al universo.
- Obtención de matrices parciales (por modo, por línea, por motivo...)

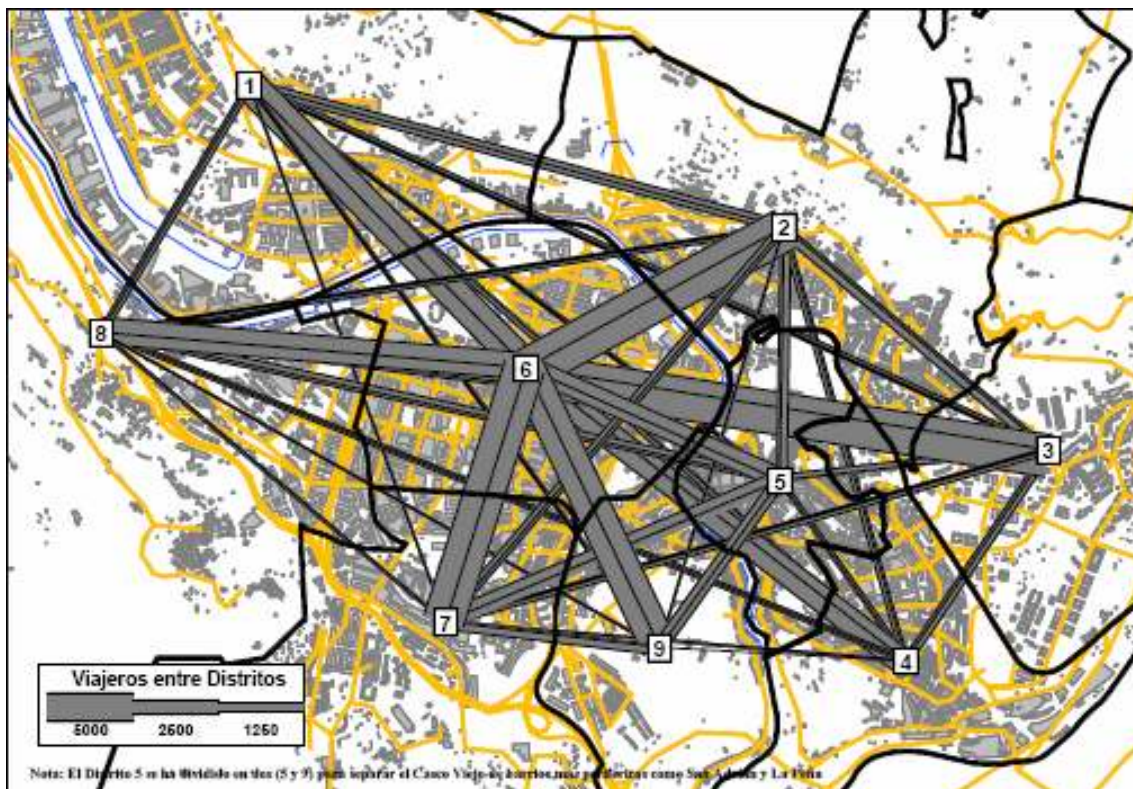
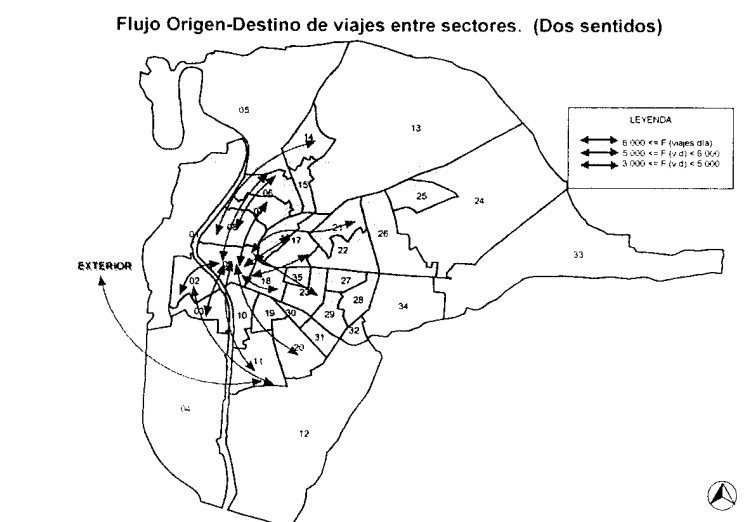


Figura 5.8 Elaboración de la matriz de origen - destino. Ejemplo Bilbao.

En particular se precisan las siguientes bases de datos:

- Matrices OD previas no ajustadas, obtenidas mediante la expansión, al censo, de los datos de la encuesta de movilidad. Subdivididas en matrices de viajes en cada uno de los modos de transporte y en las franjas horarias de hora punta y 24 horas.

- Matrices Generación - Atracción, obtenidas mediante la expansión, al censo, de los datos de la encuesta de movilidad. Subdivididas en matrices de viajes en cada uno de los modos de transporte y en las franjas horarias de hora punta y 24 horas, como mínimo.
- Zonificación.
- Variables socioeconómicas de las zonas y elevadores estadísticos.
- Distancias interzonales.
- Características de cada individuo encuestado.



MATRIZ ORIGEN-DESTINO DE VIAJES A NIVEL DE DISTRITOS ⁽¹⁾

Suma de TOTAL	DISTRIDEST							Total general
DISTRIORIG	1	2	3	4	5	6	9	
1	4.790	16.970	15.391	10.555	13.533	8.069	1.831	71.137
2	18.041	11.598	11.146	2.955	8.660	6.580	2.162	61.141
3	13.546	8.367	11.695	11.344	10.426	8.370	2.514	66.261
4	10.630	3.007	14.431	7.125	7.132	5.093	1.100	48.518
5	12.820	6.897	12.813	7.756	13.272	7.976	3.583	65.116
6	8.912	5.888	9.198	4.273	7.236	5.663	2.009	43.180
9	2.495	2.153	3.651	1.390	3.662	2.487	1.277	17.115
Total general	71.233	54.880	78.325	45.398	63.919	44.239	14.475	372.469

(1) Distrito 9: Exterior a Sevilla
Fuente: E.P. a partir del sube y baja y encuesta O-D de usuarios. Marzo - Abril de 2.000

Figura 5.9 Elaboración de la matriz de movilidad

5.4. Modelización

Un modelo es una representación simplificada de la realidad, que permite simular el comportamiento de un determinado fenómeno, en condiciones controladas.

La modelización de la movilidad tiene en la actualidad un número muy amplio de facetas. En esta sección se abordan dos de los aspectos más comúnmente conocidos y útiles: la determinación de la demanda de transporte, cuya finalidad es conocer el número de viajes que se generan en una determinada región en estudio y su distribución hacia los correspondientes destinos, y la identificación del medio de transporte utilizado en los viajes generados, que dan lugar a los modelos de reparto.

Previamente a la realización de cualquier tipo de modelado es preciso asegurarse de la bondad de los datos de movilidad capturados en el proceso de la realización de la encuesta, de su correcta distribución y que las matrices de viajes obtenidas por la expansión de los datos capturados corresponden más o menos fidedignamente a la situación de movilidad real. Este proceso exige que las matrices de viajes sean ajustadas contrastándolas con datos de fácil disponibilidad (tales como los aforos de tráfico y conteos sube - baja para viajeros de las líneas de transporte público). Por ello el primer proceso que experimentarán los datos, previo a su utilización en la etapa de modelado es la estimación de las matrices de viajes reales mediante el ajuste de los datos capturados.

Posteriormente se infieren los modelos de demanda propiamente llamados, compuestos de submodelos de generación, atracción y distribución. En este ámbito, y para este estudio se deben de llevar a cabo dos tipos de modelizaciones, conocidas con los nombres genéricos de modelos de generación-atracción-distribución.

Aunque a continuación se hablará detenidamente sobre cada uno de los tipos de modelos a implementar, cabe hacer hincapié aquí en una consideración de carácter general para todos ellos: todos los modelos que se podrán generar deberán estar sujetos a revisión y actualizaciones continuas, para poder tener en cuenta así las posibles modificaciones que se produzcan en las relaciones matemáticas (cualitativas y cuantitativas) existentes entre las variables que los definen.

Esta etapa engloba dos tipos de modelizaciones características en todos los estudios de planificación analítica del transporte: Modelos de Generación-Atracción de Viajes y Modelos de Distribución de Viajes, los cuales se conocen genéricamente como Modelos de Demanda.

Los modelos de demanda resultantes son fundamentales a la hora de realizar todo tipo de prognosis sobre hipotéticos escenarios futuros.

Los modelos de generación-atracción proporcionan sendos vectores de atracción y de generación, que contienen, respectivamente, los viajes generados y atraídos por cada una de las zonas de transporte en que se divide el área urbana objeto de estudio. El modelo de distribución reproduce el patrón origen-destino según el cual se distribuyen en la red de transporte los viajes generados y atraídos, es decir, el número de viajes que tienen lugar entre cada pareja de zonas de transporte.

El proceso de reparto modal se aborda mediante la sintetización de un modelo de elección discreta, es decir, se realiza la distribución de viajes entre los modos disponibles. Modelos de tipo logit o probit.

Finalmente se produce la asignación, la elección de rutas en cada modo. Se utilizan modelos basados en equilibrio, restricciones de capacidad, etc.

El análisis de una red de transporte, definida en una región o territorio, exige previamente que ésta se abstraiga matemáticamente para, posteriormente, informatizarla y poderla manipular con facilidad. Este proceso conlleva una serie de pasos que pueden concretarse en los siguientes:

- Modelización de la red viaria. Corresponde a la definición topológica de la red, estando constituida de nodos, arcos y centroides. Mediante el uso de nodos se modelizan las intersecciones y puntos de interés en los que se desea centrar la atención del estudio; Los arcos representarán las vías de conexión entre estos nudos y corresponden a tramos del viario físico real. Cada arco incluirá en sus características las peculiaridades físicas del tramo al que representa: longitud, sección, tipo de vía, capacidad, velocidad de flujo libre y para distintos niveles de uso y congestión, etc. Este proceso lleva consigo la codificación informática de la red, vía GIS con capacidad de transferencia de ficheros al programa de asignación (EMME/2, TRIPS, MINUTP, SATURN, TRANSCAD, TRAMOS, HYPERPLAN, etc.). El resultado de esta etapa es el grafo de la red.

- Modelización de los modos de transporte. Implica la definición de los modos de transporte a considerar, privado y público. Teniendo en cuenta que tanto uno como otro pueden subclasificarse en diferentes medios; por ejemplo, el modo público se subclasifica en los diferentes transportes de superficie existentes y en el transporte subterráneo (cuando exista o se encuentre previsto).

- Contraste de la red. Consiste en la comprobación de que ciertos resultados proporcionados por el modelo de la red se corresponden con la realidad observada en la red real: Los caminos mínimos entre cada par de zonas, proporcionados por el modelo, coinciden con la realidad. Los tiempos de viaje entre parejas de zonas, en el modelo, se

encuentran en el mismo orden de magnitud que lo que sucede en la realidad. Los costos generalizados, impedancias, representan la realidad.

5.4.1. Metodología de construcción de un grafo para un modelo de red de transporte

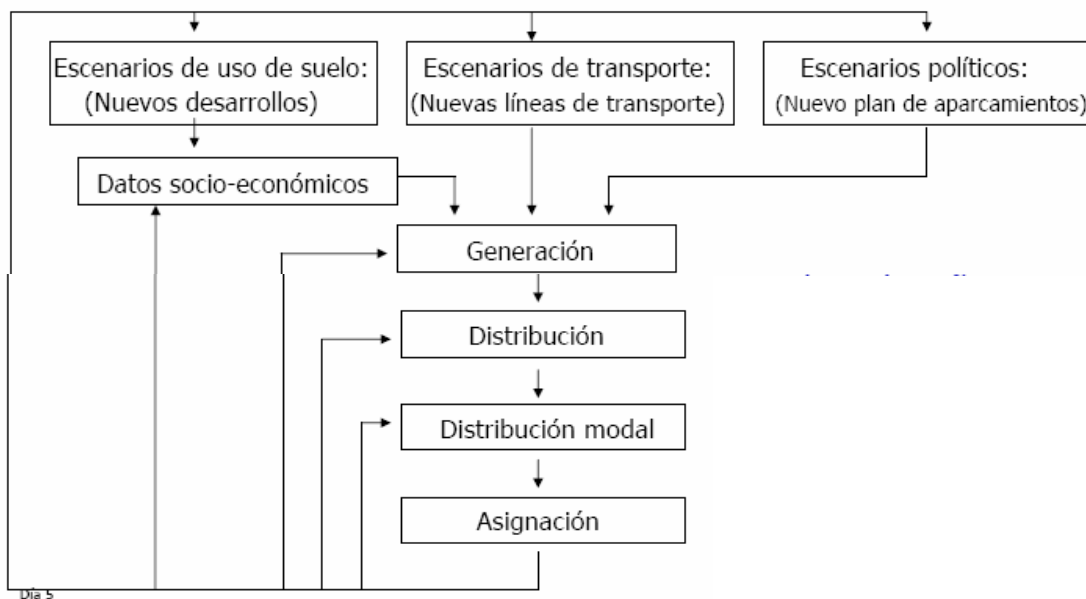


Figura 5.10 Modelos de Planificación

La elaboración de un grafo de red consta de las siguientes fases:

1. Análisis de la red viaria real.
2. Selección del viario a modelar.
3. Jerarquización del viario.
4. Discretización de los elementos del viario, mediante el uso de nodos y arcos.

La definición de los nodos puede hacerse mediante las coordenadas UTM de los puntos correspondientes a su representación cartográfica. Los arcos se definen como elementos que unen un nodo origen con otro destino. Los nodos y arcos se codifican de esta manera sobre la cartografía de referencia. A través

de una correspondencia biunívoca se puede trasladar esta representación informática al formato capaz de ser leído por un programa de asignación de transporte.

El modelo así creado será adecuado si y solo si es capaz de reproducir con suficiente grado de exactitud las características observadas reales. De aquí que la selección de los parámetros que definen la red, así como el nivel de detalle que se adopte serán aspectos decisivos en la modelización.

5.4.2. Modelos para la optimización de rutas y frecuencias

El principal componente que caracteriza a cada uno de los modelos, es su formulación. En particular la función objetivo reflejará tanto los intereses de los clientes (pasajeros) como de los operadores (empresas de transporte). Los modelos presentados en este capítulo, en general, buscan maximizar el nivel de servicio, minimizando el uso de los recursos, según determinadas restricciones. Estos objetivos son generalmente contrapuestos, una mejora en uno implica un detrimento en el otro; la importancia relativa de los componentes de la función objetivo es una decisión política, por tanto, será definida por las entidades reguladoras del sistema. La siguiente tabla presenta un resumen de las características de algunos modelos comunes.

<i>Autor(es)</i>	<i>Función objetivo</i>	<i>Restricciones</i>	<i>Aportes</i>	<i>Limitaciones</i>
Baaj y Mahmassani (1991)	Mín. tiempos de transferencia y tamaño de flota	Frecuencia factible Factor de carga Tamaño de flota	Varios parámetros configurables	Coefficientes de conversión en fn. Objetivo
Israeli y Ceder (1993)	Mín. tiempos de transferencia y tamaño de flota (multiobjetivo)	No especificadas	Formulación multiobjetivo	
Ngamchai y Lovell (2000)	Mín. tiempos de transferencia y tamaño de flota (detallado)	Factor de carga	Modelo detallado, frecuencias óptimas	Coefficientes de conversión en fn. objetivo
Gruttnar, Punninghoff, Tudela y Diaz (2002)	Máx. beneficios de operador y mín. costos de usuario	Dist. de acceso y egreso (a origen y destino)	Modelo alternativo de asignación (logit)	Falta tratamiento de frecuencias y flota Coefficientes de conversión en fn. objetivo

Tabla 5.1. Comparación de modelos.

5.4.2.1. Baaj y Mahmassani (1991)

Se plantea minimizar los tiempos totales de transbordo de pasajeros y el tamaño de la flota requerido, sujeto a restricciones de frecuencia, factor de carga y tamaño de flota. La formulación del modelo es:

$$\min \left\{ C_1 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} t_{ij} + C_2 \sum_{k \in R} f_k t_k \right\}$$

sa

$$f_k \geq f_{\min} \quad \forall k \in R \quad (\text{frecuencia factible})$$

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{\max}}{f_k CAP} \leq LF_{\max} \quad \forall k \in R \quad (\text{factor de carga})$$

$$\sum_{k \in R} N_k = \sum_{k \in R} f_k t_k \leq W \quad (\text{tamaño de flota})$$

Donde:

n : cantidad de nodos de la red

d_{ij} : demanda (viajes por unidad de tiempo) entre los nodos i y j

t_{ij} : tiempo total de viaje entre i y j (en vehículo, espera y acceso)

N_k : cantidad de autobuses funcionando en la ruta k . $N_k = f_k T_k$

f_{ij} : frecuencia de autobuses operando en la ruta k .

f_{\min} : frecuencia mínima permitida para toda ruta

T_k : tiempo total de viaje de la ruta k

W : tamaño de la flota disponible (cantidad de autobuses por hora)

LF_k : factor de carga en la ruta k

$(Q_k)_{\max}$: máximo flujo por arco en la ruta k

CAP : número de asientos de los autobuses

LF_{\max} : máximo factor de carga permitido

R : conjunto de rutas para una solución dada.

C_1 y C_2 : factores de conversión y pesos relativos de los términos de la función objetivo.

Este modelo es el de base utilizado por varios de los autores que se reseñan posteriormente. Los principales aspectos del problema son tenidos en cuenta,

así como una variedad de parámetros y restricciones (factor de carga, por ejemplo). Es flexible, ya que permite la incorporación del conocimiento de los usuarios, por ejemplo, restricciones de mínima proporción de demanda cubierta. Los componentes de la función objetivo se expresan en distintas unidades, obligando a utilizar coeficientes de conversión.

5.4.2.2. Israeli y Ceder (1993)

Este modelo es similar al propuesto por Baaj y Mahmassani (1991), pero se formula como un problema de optimización multiobjetivo.

$$\begin{aligned} \min \quad & Z_1 = a_1 \sum_{i,j \in N} PH_{ij} + a_2 \sum_{i,j \in N} WH_{ij} + a_3 \sum_{r \in R} EH_r \\ \min \quad & Z_2 = FS \end{aligned}$$

PH_{ij} : cantidad de pasajeros/hora, entre los nodos i y j (mide el tiempo de viaje en vehículo de los pasajeros)

WH_{ij} : tiempo de espera de pasajeros entre los nodos i y j ;

EH_r : tiempo de viaje vacío, que refleja la utilización de los autobuses;

FS : tamaño de la flota;

R : conjunto de rutas para una solución dada;

a_1 , a_2 y a_3 : Pesos que reflejan la importancia relativa de los términos de la función Z_1 .

5.4.2.3. Ngamchai y Lovell (2000)

Con una formulación similar a la propuesta por Baaj y Mahmassani (1991), este modelo permite calcular frecuencias de rutas; aunque requiere del uso de coeficientes de conversión a la misma unidad (€/hora) de todas las componentes de la función objetivo.

$$\min \{FC + UVC + UWC\}$$

donde

$$FC = \frac{2C_V}{V} \sum_{k=1}^R \frac{d_k}{h_k} \quad (\text{costo de la flota})$$

$$UVC = \frac{\gamma_V}{V} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} D_{ij} \quad (\text{costo de viaje en vehiculo de los usuarios})$$

$$UWC = \frac{\gamma_w}{2} \sum_{k=1}^R \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk} h_k \quad (\text{costo de espera de los usuarios})$$

donde

m : cantidad de nodos de la red;

R : cantidad de rutas de una solución determinada;

CV : costo por hora de operación de los autobuses;

V : velocidad de los autobuses en la red;

d_k : largo de la ruta k ;

q_{ij} : demanda entre los nodos i y j (cantidad de viajes por hora);

D_{ij} : largo de la ruta más corta seleccionada por los pasajeros viajando de i a j ;

α_{ijk} : $\alpha_{ijk} = 1$ si la ruta k utiliza el arco (ij) , $\alpha_{ijk} = 0$ en caso contrario;

γ_V y γ_w : coeficientes que reflejan el valor subjetivo de los tiempos de viaje y espera;

h_k : espaciamiento temporal del servicio operante en la ruta k (inverso de la frecuencia)

$$h_k = \min \left(\sqrt{\frac{4d_k C_V}{\gamma_w V \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m q_{ij} \alpha_{ijk}}}, h_k^{\max} \right)$$

donde h_k^{\max} depende del factor de carga y del arco con mayor flujo en la ruta k .

5.4.2.4. Gruttner, Punninghoff, Tudela y Díaz (2002)

Este modelo difiere de todos los anteriores en la especificación de los componentes del sistema. Propone un modelo de asignación alternativo, que usa el método **logit** mediante el cálculo de utilidades de cada línea para cada par origen-destino (*ij*). No se contemplan aspectos tales como la determinación de frecuencias y el dimensionamiento de flota; requiere la utilización de coeficientes de conversión y de valores subjetivos del tiempo. La función objetivo del modelo es:

$$\max \{ \alpha FO(R_i) - \beta FU(R_i) \}$$

donde

R_i : *i*-ésima ruta válida ($R_i \in R$, conjunto de rutas válidas);

α y β : coeficientes que representan la importancia relativa de cada objetivo;

$FO = IO_L - CO_L$; (función de beneficio del operador)

$IO_L = AF_L T_L$ (ingreso operador)

$CO_L = Distancia_L K_L$ (costo operador)

AF_L : afluencia total de viajes que atrae la ruta *L*;

T_L : tarifa cobrada por la línea *L*;

K_L : costo unitario de operación por kilómetro;

$FU = CU_L = \sum_i \sum_i (\delta t_{ijL}^a + t_{ijL}^v + \eta t_{ijL}^e) \times VST \times V_{ijL}$ (función de costo del usuario)

t_{ijL}^a , t_{ijL}^v , t_{ijL}^e : los tiempos de acceso a la línea, de viaje y de espera respectivamente;

VST : valor subjetivo del tiempo;

V_{ijL} : número de viajes entre cada par origen-destino (*ij*) que utilizan la línea *L*;

δ y η : pesos relativos de los tiempos de acceso y espera con respecto al tiempo de viaje.

5.4.3. Algoritmos para la optimización de recorridos y frecuencias de autobuses

Se presentan una serie de modelos y algoritmos para la optimización de rutas y frecuencias de autobuses, necesario para el desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones para el diseño de sistemas de transporte público urbano colectivo. El problema es bastante complejo por lo que diversos procedimientos heurísticos para resolverlo han sido propuestos en la literatura.

Se percibe una evolución hacia la utilización de algoritmos genéticos, similar a la ocurrida en otras áreas de la optimización combinatoria. Los métodos que aparentan ser más aplicables son aquellos que permiten la interactividad. La calidad de las soluciones sólo pueden probarse después de su implantación.

El problema de la determinación de frecuencias variables en el tiempo (a partir de requerimientos de demanda también variables en el tiempo) está también abierto.

Los algoritmos que se presentan, se basan en modelos de programación matemática resueltos con métodos aproximados, heurísticas y metaheurísticas.

Los algoritmos parten de una solución inicial (conjunto de rutas), que se mejora iterativamente, generalmente avanzando según tres fases bien diferenciadas: 1) *generación*, 2) *evaluación* y 3) *mejora* de soluciones, con algunas variantes en cada una de ellas.

En la fase de *generación de soluciones* se construye un conjunto de rutas que cubre la demanda, según criterios varios: camino más corto, aleatorio, etc. El cubrimiento puede ser total o parcial; en este último caso, se puede especificar la proporción de la demanda insatisfecha. La matriz origen-destino puede, o no, ser contemplada en esta fase, siendo un acuerdo general que la disposición de

las rutas debe estar fuertemente relacionada con la estructura de la matriz; por ejemplo, una matriz donde una columna o fila domina a todas las demás debería generar un conjunto radial de rutas.

La *evaluación de la solución* implica calcular la función objetivo del modelo. En la elección del método habrá un compromiso entre eficiencia (en tiempos de ejecución) y nivel de agregación de los elementos del sistema. La mayoría de los métodos consideran los pasajeros a un alto nivel de agregación de tipo “cantidad de pasajeros para cada par origen-destino”. En cuanto a la asignación de pasajeros a rutas, los métodos utilizados en el marco del tránsito privado no son aplicables directamente al caso de transporte público [Ortúzar y Willumnsen, 1996].

La *mejora de soluciones* se realiza a distintos niveles. A nivel de sistema, puede implicar, por ejemplo, un ajuste de los parámetros de generación de las soluciones iniciales; a nivel de componente, se implementa usualmente realizando intercambios de nodos entre las distintas rutas.

En esta fase es donde mayormente se aplican técnicas de búsqueda local y metaheurísticas.

5.4.3.1. Baaj y Mahmassani (1991)

La metodología propuesta opera en base a la generación, evaluación y mejora de rutas. Inicialmente se genera un conjunto de rutas considerando la matriz origen-destino como guía principal y se encuentra los dos caminos más cortos entre un subconjunto de M pares de nodos de alta demanda, considerados en forma decreciente por su valor. Un parámetro de entrada especifica la proporción de demanda que se puede dejar sin satisfacer. Se insertan nodos adicionales en este esqueleto inicial de rutas, según reglas preestablecidas. El procedimiento de generación se repite, variando parámetros, obteniendo soluciones a diferentes compromisos entre objetivos. La regla principal para

asignar la demanda es el criterio de minimización de transbordos; para cada par (ij) de nodos se chequea si es posible viajar sin transbordos. Si no es posible, las alternativas de viaje con 1 ó 2 transbordos son contempladas.

Además, se asignan los flujos de pasajeros en cada arco de la red, y se determinan las frecuencias válidas que cumplen con el valor del factor de carga establecido. Este procedimiento se repite hasta lograr convergencia (diferencia aceptada entre frecuencias de entrada y salida del algoritmo). Por otra parte la mejora de rutas opera en dos niveles bien diferenciados: cubrimiento del sistema (discontinuo de servicios con poca carga de pasajeros, o con rutas muy cortas) y estructura de las rutas (combinando o dividiendo rutas).

Los algoritmos de estos autores tienen la ventaja de proveer cierto grado de interactividad para definir algunas restricciones y parámetros; es flexible por su modularidad, permite planificaciones tanto a mediano como largo plazo. Su principal limitación es que no propone una manera sistemática de variar los parámetros para generar diferentes soluciones.

5.4.3.2. Shih, Mahmassani y Baaj (1998)

Estos autores proponen una extensión del método de Baaj y Mahmassani (1991) que se adecua particularmente a la planificación de servicios coordinados de transporte multimodal, en modalidad de flota heterogénea.

Utilizan como base los mismos procedimientos heurísticos, agregándoles el concepto de centro de transferencia (comerciales y de empleo). Un centro de transferencia se detecta en base a los datos de producción y atracción de viajes, y tomando en cuenta métricas descriptivas de nodos, computadas por el procedimiento de evaluación de rutas, o manualmente.

Una vez identificados los centros, las rutas se construyen considerándolos. Para las rutas que pasan por los centros, las frecuencias se determinan como

múltiplos enteros de una frecuencia base, de manera de permitir coordinación entre rutas que comparten centros de transferencia.

5.4.3.3. Israeli y Ceder (1993 y 1998)

Resuelven los problemas de diseño de rutas y horarios simultáneamente, en base al modelo, de su autoría visto anteriormente, de programación matemática no lineal, con variables mixtas, múltiples objetivos (minimización de los tiempos de viaje y minimización del tamaño de la flota).

El modelo se resuelve en tres fases: primero se generan varios conjuntos de soluciones alternativas no dominadas, resolviendo un problema de cubrimiento de conjuntos; luego se realiza un procedimiento de asignación (no descrito), que determina las frecuencias. Para la exploración de soluciones alternativas se utiliza un método de búsqueda local que intenta no repetir soluciones ya encontradas, de forma de no iniciar ciclos. Finalmente se evalúan y seleccionan las alternativas más adecuadas, aplicando un método adaptado de "compromised programming" para optimización multiobjetivo. Sus principales aportes son: el tratamiento formal del problema (reduciendo algunos subproblemas a problemas clásicos como el de *set covering*), y el método propuesto para la identificación de las soluciones no dominadas.

5.4.3.4. Pattnaik, Mohan, y Tom (1998)

Sobre la base del modelo de Baaj y Mahmassani, estos autores proponen un algoritmo que inicialmente genera un conjunto de rutas en función de los caminos más cortos entre todo par de nodos y caminos alternativos. Se chequean rutas superpuestas que no cumplan con ciertas restricciones (por ejemplo, de mínimo largo) y se almacenan como conjunto de rutas candidatas. Se utilizan algoritmos genéticos para seleccionar subconjuntos del conjunto de rutas candidatas, siendo este un aporte en cuanto a la utilización de metaheurísticas en la resolución del problema. El procedimiento de evaluación

de soluciones, así como la determinación de frecuencias es similar al utilizado por Baaj y Mahmassani (1991).

5.4.3.5. Ngamchai y Lovell (2000)

Basado en el modelo propuesto por los mismos autores, este método genera rutas sin tener en cuenta la matriz de demandas; pero alcanzando a todos los nodos de la red. Dado que utiliza algoritmos genéticos, inicialmente se crea una población de una cantidad determinada de conjuntos de rutas. En cada iteración, un integrante de la población es mejorado a través de la aplicación de una serie de operadores genéticos cuya particularidad es que son específicos del problema, no utilizándose los estándares (reproducción, cruzamiento y mutación). La función objetivo se evalúa a través de una formulación explícita que incluye los tiempos de viaje y espera para pasajeros y el costo de operación de la flota (convertidos a la misma unidad). Las frecuencias se determinan de forma de minimizar el valor de la función objetivo (formulación explícita, obtenida en forma analítica). Una limitación de este método es que parte de soluciones iniciales que no tienen en cuenta la matriz de demandas.

Un aporte es la propuesta de nuevos operadores genéticos que buscan mejorar las soluciones generando nuevas subrutas, a partir de rutas en las que existe variación de flujo mayor o igual que un parámetro dado.

5.4.3.6. Rao, Muralidhar y Dhingra (2000)

Este enfoque se basa en el modelo y algoritmos de Baaj y Mahmassani (1991). Inicialmente se aplica un procedimiento de identificación de corredores, el cual implica el cálculo de caminos más cortos entre todo par de nodos de la red, asignación de demanda a rutas y chequeo de restricciones de mínimo y máximo flujo de pasajeros en arcos. Este procedimiento identifica el subconjunto de nodos que participará en el procedimiento de generación de rutas. En la generación de soluciones iniciales, se considera un único objetivo,

el de minimizar los tiempos de viaje de los pasajeros. Se generan K caminos entre cada par de nodos de alto flujo (K dado por el usuario) y se utilizan algoritmos genéticos para seleccionar uno de los K entre todo par de nodos. El procedimiento de evaluación (principalmente el de asignación) de cada solución es también similar al utilizado por Baaj y Mahmassani (1991).

En una segunda fase se determinan las frecuencias óptimas para la solución hallada en la fase anterior. Nuevamente se utilizan algoritmos genéticos, donde ahora la función objetivo incorpora los objetivos del operador, en la forma de costo de flota, y los tiempos de espera en los costos del usuario. El principal parámetro que controla este proceso es el factor de carga de los autobuses.

5.4.3.7. Caramia, Carotenuto, y Confessore (2001)

La metodología propuesta requiere de un conjunto inicial de rutas (las actuales del sistema de transporte público urbano colectivo) a ser mejoradas. Utilizan algoritmos genéticos, donde la población es de cardinalidad prefijada, y cada gen corresponde a una línea; su valor es un par, el primer componente indica el estado de la ruta en esa configuración (prendida o apagada) y el segundo un valor para su frecuencia. El enfoque es similar al utilizado por Pattnaik, Mohan, y Tom (1998).

La particularidad de este trabajo es que utiliza una red neuronal para la evaluación de la función objetivo. El entrenamiento de la red se realiza “off-line” en base a un cierto número de casos de prueba, donde para cada uno se efectúa un procedimiento de asignación y de análisis multicriterio para determinar el valor de la función objetivo.

5.4.3.8. Gruttner, Pinninghoff, Tudela, y Díaz (2002)

Los autores utilizan algoritmos genéticos en el sentido clásico. La asignación de pasajeros a rutas se efectúa utilizando un modelo logit, calculando

previamente la utilidad de cada línea para cada tipo de pasajero (cada par (ij)) y la evaluación de la calidad de las soluciones tiene en cuenta los tiempos de viaje y de espera. Una dificultad importante, es la implementación de los operadores genéticos, en particular los de cruzamiento y mutación; dado que las soluciones están formadas por rutas, estas deben ser conexas (secuencias válidas de nodos), y esta condición debe chequearse al momento de aplicar los operadores. Se mencionan resultados obtenidos según la variación de los parámetros que regulan el trade-off entre los distintos objetivos, consistiendo en rutas largas concentradas en zonas de alta demanda cuando se le da prioridad al operador, y muchas rutas dispersas cuando se le da prioridad a los usuarios.

En la siguiente tabla se muestra una comparativa de los diferentes modelos y algoritmos estudiados.

<i>Autor(es)</i>	<i>Modelo</i>	<i>Generación</i>	<i>Evaluación</i>	<i>Mejora</i>	<i>Ensayos</i>	<i>Aportes</i>	<i>Limitaciones</i>
Baaj y Mahmassani (1991)	Baaj y Mahmassani (1991)	Caminos más cortos entre pares de nodos de alta demanda	Asignación: min transferencias y tiempo, prop. frecuencias	Combinación y división de rutas (heurística)	Red ficticia (15 nodos - Mandl, 1979) Austin (140 nodos)	Modularización y parametrización	No hay exploración del dominio de parámetros
Shih, Mahmassani y Baaj (1998)	Baaj y Mahmassani (1991) aumentado	Idem anterior	Idem anterior	Idem anterior	Austin (140 nodos)	Centros de transferencia y flota heterogénea	Idem anterior
Israeli y Ceder (1993 y 1998)	Israeli y Ceder (1993 y 1998)	Cubrimiento de conjuntos (heurística)	No especificada	Búsqueda local con prevención de ciclos	Red ficticia (8 nodos)	Formalización Optimización multiobjetivo	Caso de prueba pequeño
Patnaik, Mohan y Tom (1998)	Baaj y Mahmassani (1991)	Exhaustivo, muchas rutas factibles	Idem Baaj y Mahmassani (1991)	Selección del subconjunto óptimo de rutas (A. Genéticos)	Madras (25 nodos)	Metaheurísticas para búsqueda eficiente	-
Ngamchai y Lovell (2000)	Ngamchai y Lovell (2000)	Aleatoria	No especificada	Operadores genéticos específicos	Red ficticia (19 nodos)	Frecuencias óptimas Procedimiento de mejora	Generación no tiene en cuenta la demanda
Rao, Muralidhar y Dbingra (2000)	Baaj y Mahmassani (1991)	Idem Baaj y Mahmassani, con identificación de corredores	Idem Baaj y Mahmassani (1991)	Optimización de rutas y frecuencias en dos fases (A. Genéticos)	Red ficticia (15 nodos - Mandl, 1979)	Metaheurísticas para exploración del dominio de los parámetros	-
Caramia, Carotemuto y Confessore (2001)	No se especifica	Rutas preestablecidas	Asignación "off-line" Evaluación con redes neuronales	Selección del subconjunto óptimo de rutas y determinación de frecuencias (A. Genéticos)	Parma (80 líneas)	Aplicable a planificación a corto y mediano plazo	-
Grutner, Pimninghoff, Tudela y Díaz (2002)	Grutner, Pimninghoff, Tudela y Díaz (2000)	Aleatoria	Asignación utilizando modelo logit	A. Genéticos en la estructura de las rutas	Los Angeles (dimensión no especificada)	Implementación sencilla	Generación no tiene en cuenta la demanda

Tabla 5.2 Comparación de algoritmos.

5.4.4. Codificación de redes

La determinación de las áreas y de la demanda que el transporte sirve, real o potencialmente, constituye un componente obligado en los estudios destinados a planificarlo o gestionarlo. Un conocimiento riguroso de las mismas por parte de los responsables de la oferta contribuye a que se pueda tanto diagnosticar mejor las situaciones reales, como anticipar las implicaciones probables derivadas de las intervenciones sobre dicha actividad. Al respecto, el contexto actual de disponibilidad de más datos y de mejor calidad, hace posible avistar un estadio superior a otros precedentes, en materia de información elaborada a partir del proceso de investigación. Parece obvio que, a partir de datos más exactos, se podrían derivar decisiones más atinadas y, consecuentemente, lograr una mayor efectividad en la consecución de las metas fijadas por los proveedores de servicios de transporte público. La disponibilidad de sofisticadas herramientas, en particular los GIS, hace viable abordar con aceptable eficiencia la manipulación de datos y la ejecución de análisis, de acuerdo con planteamientos metodológicos alternativos, cuya bondad relativa cabe confrontar, en aras de posibilitar una elección conveniente entre ellos.

El planteamiento convencional parte de establecer un alcance espacial (o una serie ellos) para cada parada o estación y averiguar luego la demanda potencial comprendida dentro de ese ámbito próximo. La investigación, por afrontar ese problema, se sitúa en un ámbito donde convergen los análisis centrados en la accesibilidad espacial (Wachs y Kumagai, 1973; Öberg, 1976; Robinson, 1977; Pirie, 1979; Koenig, 1980; Jones, 1981; Izquierdo y Monzón, 1992; García Palomares, 2000), entendida como contornos alrededor de los puntos o lugares a los que se desea llegar (en nuestro caso serán las paradas de las líneas de transporte), y las indagaciones sobre delimitación de áreas de mercado (O'Kelly y Miller, 1989; Moreno, en prensa), en la medida en que es posible concebir una parada o estación de una línea de transporte como un punto de oferta que puede dar servicio a la población que vive, trabaja, estudia, transita, etc. en sus inmediaciones.

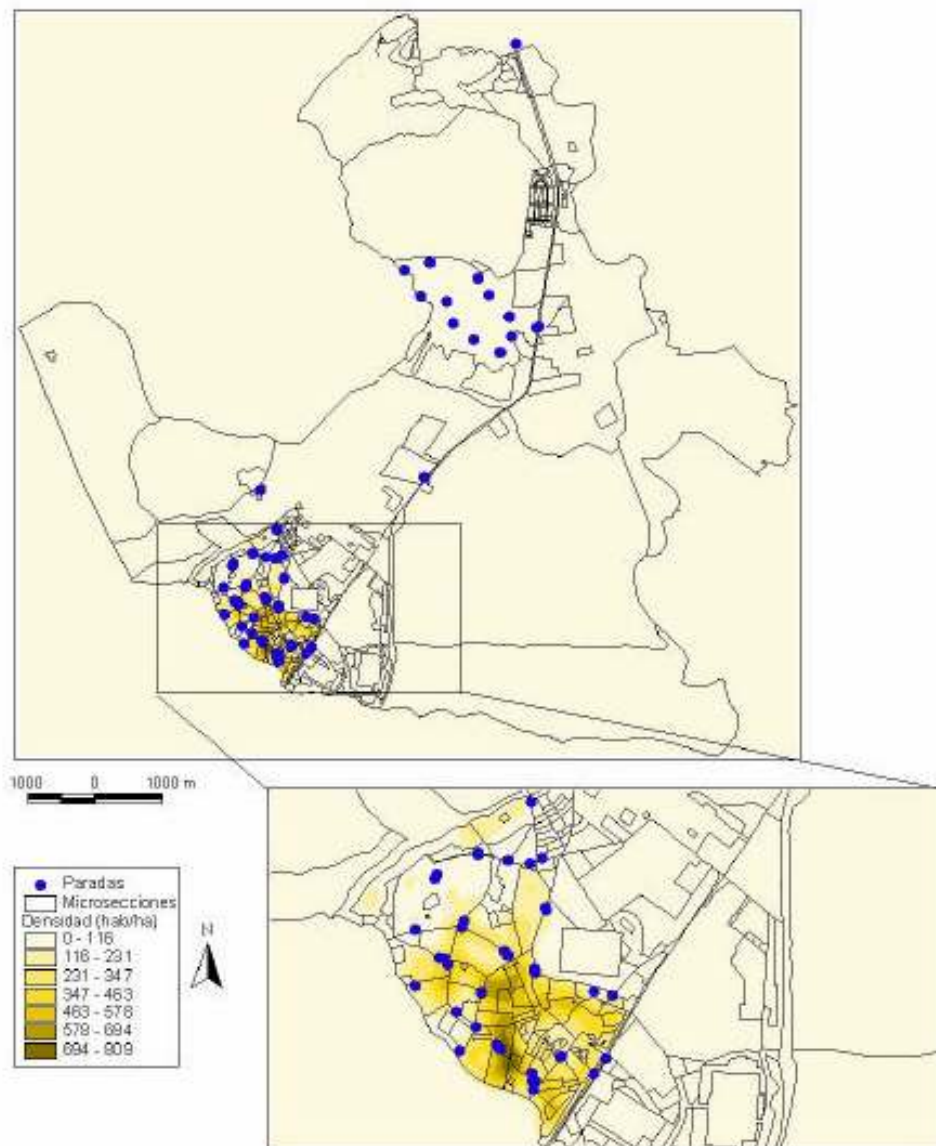


Figura 5.11 Codificación de redes.

Pueden surgir problemas concernientes a la métrica espacial adoptada, como en lo relativo a la forma de georeferenciación de la demanda. La medición de la distancia o coste espacial puede optar entre varias alternativas: distancias en línea recta, distancias por vías de tráfico, tiempo de trayecto, coste económico, etc. La demanda, por ejemplo, los usuarios potenciales a servir, es susceptible también de ser georeferenciada de varias formas: por polígonos establecidos con fines varios (zonas de transporte, secciones censales, manzanas, etc.), segmentos de calles, direcciones postales, etc.

Por tanto, la codificación de las redes se hace conforme a las características del programa de asignación. Hay una serie de paquetes comerciales: **TRANSCAD, EMME/2, TRANUS, MINUTP, TRIPS, TRANPLAN, TP+, QRSII, VISSUM, HYPERPLAN, SATURN** (desarrollado por ITS de la universidad de Leeds, **TRAMOS** (desarrollado por el Departamento de Organización de la ESI de Sevilla, etc.

Estos paquetes modelan en detalle las principales intersecciones urbanas e interurbanas, enlaces y movimientos prohibidos. Calibran la red mediante la definición de funciones de coste para cada tipo de arco, contrastando los valores de velocidad-flujo que se presentan en la red real. Modelaran los conectares, arcos que unen centroides con nodos, considerando los costes de acceso promedios de las zonas a las que pertenecen. Estos arcos pertenecerán al nivel jerárquico más bajo de la red. La información que se precisa se gestiona con un sistema de información geográfico (GIS).

5.4.4.1. Sistema de Información Geográfica (GIS)

Un GIS engloba en sí varios conceptos: Datos y teorías sobre los datos, hardware y software, diversos intereses (científicos, de gestión y comerciales), diversas disciplinas científicas (matemáticas, informática, cartografía, geografía, biología, ingeniería, etc.) que previamente aparecían aisladas.

En general, un Sistema de Información consiste en la unión de información y herramientas informáticas (programas) para su análisis con unos objetivos concretos. En el caso de los GIS, se asume que la información incluye la posición en el espacio.

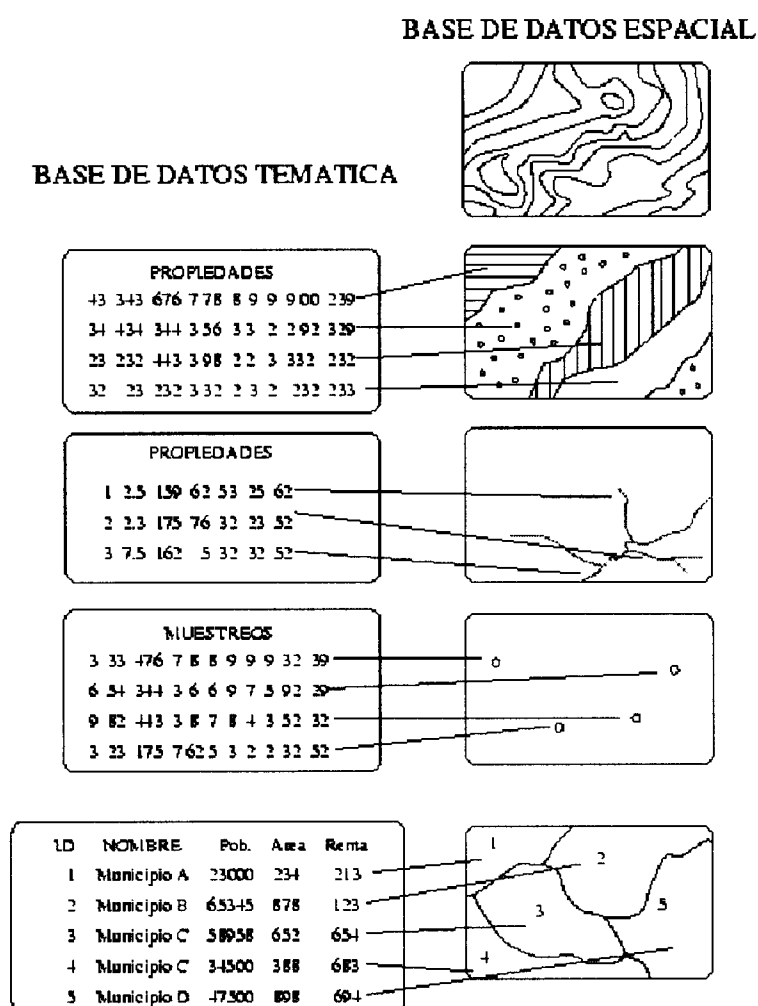


Figura 5.12 Esquema de la base de datos de un GIS

La base de un Sistema de Información Geográfica es, por tanto, una serie de capas de información espacial en formato digital que representan diversas variables (formato ráster), o bien capas que representan objetos (formato vectorial) a los que corresponden varias entradas en una base de datos enlazada. Esta estructura permite combinar, en un mismo sistema, información con orígenes y formatos muy diversos incrementando la complejidad del sistema.

Los Sistemas de Información Geográfica se han desarrollado a partir de la unión de diversos tipos de aplicaciones informáticas: la cartografía automática

tradicional, los sistemas de gestión de bases de datos, las herramientas de análisis digital de imágenes, los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y las técnicas de modelización física.

Podríamos considerar, en sentido amplio que un GIS está constituido por:
Bases de datos espaciales en las que la realidad se codifica mediante unos modelos de datos específicos.

1. Bases de datos temáticas cuya vinculación con la base de datos cartográfica permite asignar a cada punto, línea o área del territorio unos valores temáticos.
2. Conjunto de herramientas que permiten manejar estas bases de datos de forma útil para diversos propósitos de investigación, docencia o gestión.
3. Conjunto de ordenadores y periféricos de entrada y salida que constituyen el soporte físico del GIS. Estas incluyen tanto el programa de gestión de GIS cómo otros programas de apoyo.
4. Comunidad de usuarios que pueda demandar información espacial.
5. Administradores del sistema encargados de resolver los requerimientos de los usuarios bien utilizando las herramientas disponibles o bien produciendo nuevas herramientas.

El desarrollo de una base de datos espacial conlleva una simplificación de la realidad para adaptarla a un modelo de datos. Existen dos modelos de datos básicos, vectorial y ráster.

En el modelo vectorial se considera que la realidad está dividida en una serie de objetos discretos (puntos, líneas, polígonos) a los que se puede asignar diversas propiedades, cualitativas o cuantitativas. Estos objetos se codifican por su posición en el espacio (puntos y líneas) o por la posición de sus límites

(polígonos). Los cambios de escala van a suponer en muchos casos que los objetos cambien de un tipo a otro.

Evidentemente ningún programa de GIS puede ser el mejor de los programas posibles y cubrir todas las posibles expectativas. Por tanto los programas acaban especializándose en función del tipo de datos que se supone que se van a utilizar, el tipo de aplicaciones y la lógica de trabajo.

- Según el tipo de datos:
 - GIS Ráster. Incluyen principalmente herramientas para el manejo de variables espaciales (IDRISI, GRASS, ERMapper, SPRING, PCRaster)
 - GIS Vectorial. Manejo de objetos (Arcinfo, ArcView, Mapinfo, Geomedia)

- Respecto a la forma de organizar el trabajo:
 - GIS basados en menús, orientados normalmente a la gestión tanto en empresa como en administración (ArcView, IDRISI para Windows, Mapinfo, Geomedia, SPRING)
 - GIS basados en comandos, orientados a la investigación (GRASS, Arcinfo IDRISI para MSDOS, PCRaster). La ventaja de los programas basados en comandos es la capacidad de programar y ejecutar scripts complejos.

- Respecto a la filosofía y objetivos de desarrollo:
 - GIS comerciales (Arcinfo, Geomedia, ArcView, Mapinfo, Smallworld)
 - GIS gratuitos o semigratuitos (SPRING, PCRaster, IDRISI)
 - GIS abiertos (GRASS)
 - GIS para Windows o para UNIX.

La inclusión de información espacial y temática permite llevar a cabo consultas de diverso tipo, desde las más simples a las más complejas, así como ejecutar modelos cartográficos o dinámicos.

Un punto más allá de sofisticación sería la utilización de un GIS para resolver problemas de toma de decisión en planificación física, ordenación territorial, estudios de impacto ambiental, etc. mediante el uso de instrucciones complejas del análisis espacial y álgebra de mapas.

Una capa de un Sistema de Información Geográfica es, simplemente un conjunto de números georreferenciados (formato ráster) o grupos de coordenadas que definen la ubicación de objetos espaciales (formato vectorial), para su visualización es necesario aplicar una paleta de colores.

Sin embargo la presentación de resultados requiere la introducción de otros elementos como escalas, títulos, mallas, leyendas, etc, heredados de la cartografía tradicional.

Debido al gran número y complejidad de las operaciones que un GIS debe llevar a cabo, existen una serie de características deseables en un buen programa de gestión de GIS:

- Modularidad. Prácticamente todas las operaciones de GIS pueden descomponerse en una serie de operaciones más sencillas. Por tanto un enfoque modular en el que cada operación sencilla pueda ejecutarse de forma independiente del sistema incrementa al mismo tiempo la sencillez y la flexibilidad.
- Trabajo en línea de comandos. En relación con la característica anterior, si utilizamos la línea de comandos podemos combinar fácilmente distintos módulos para crear operaciones complejas.

- Sistema abierto. Hoy en día los sistemas informáticos se dividen en abiertos o propietario. Los sistemas abiertos son aquellos de los que se conoce el código fuente (es decir cómo hacen las cosas) y, por tanto, cómo se almacenan los datos. Las ventajas de un sistema abierto estriban en que podemos decidir si los algoritmos utilizados son válidos para nuestros objetivos o no, y que podemos combinar fácilmente el programa con otros ya que si existen otros programas que funcionen mejor para algunas de las operaciones, estos deben ser usados.

5.4.4.2. EMME/2

Es un sistema de planificación multimodal del transporte. Ofrece al planificador un conjunto de herramientas detallado y flexible para el análisis y modelización de la demanda, así como para el análisis y evaluación de redes. Actualmente es utilizado por más de 600 organizaciones en 5 continentes.

Un banco de datos estructurado que permite manejar y estructurar de forma grandes cantidades de datos y de resultados relacionados con la planificación del transporte. La descripción de la red contiene los modos, arcos, giros y líneas de transporte. A cada uno de estos elementos pueden especificarse datos relevantes, como los resultados de una asignación u otros atributos definidos por el usuario. La asignación por trayectorias múltiples de permite analizar y modelar:

- varios modos de transporte (autobús, tren, etc.).
- Tiempos de viaje dependientes de los tiempos en toda la red.
- Percepciones diversas de componentes del tiempo de viaje.
- Congestión a bordo de vehículos (a través de una macro de asignación de equilibrio).
- Varias matrices de atributos de viaje: tiempos de viaje, distancias, etc.

- Uso de la red: análisis por línea, análisis de embarques y desembarques, etc.
- Viajes individuales (de dirección a dirección).

EMME/2 también incluye una asignación basada en el horario.

5.4.4.3. HYPERPLAN (MAIOR)

Permite analizar, estudiar y planificar la movilización en áreas urbanas y suburbanas. En particular, proporciona los instrumentos para planificar y evaluar la red de transporte público, para realizar planes de tráfico urbano, y para efectuar simulaciones de la permeabilidad de la demanda en las grandes áreas urbanas y en presencia de estacionamientos de intercambio entre modos diversos.

Permite adquirir datos de definición de las redes de transporte (cartográficos, topológicos y estadísticos) pública y privada, analizar los efectos de posibles modificaciones a las redes (escenarios) y restituir los resultados elaborados a los entes interesados (oficina de horarios y turnos, autoridades de transporte, etc.) En particular, se da la posibilidad de la evaluación concurrente de los impactos sobre la movilización debidos a modificaciones en las redes de transporte público y privado.

Utiliza informaciones relativas a:

- matrices O/D de los desplazamientos privados y públicos (agregadas con la misma zonificación).
- descripción de la demanda permeable (matriz de inciertos).
- descripción de la red de los ejes viales y de los límites de las zonas presentes en las matrices O/ D.
- descripción de la red de transporte público (paraderos, líneas y frecuencias).

- informaciones sobre las características de las vías (número de pistas, pistas preferenciales, número de pistas de acercamiento a los cruces, reglamentación de los virajes, ciclos de los semáforos).
- ubicación y capacidad de los estacionamientos, ya sean de intercambio y no de intercambio.
- costos y parámetros de calibración y de escala.

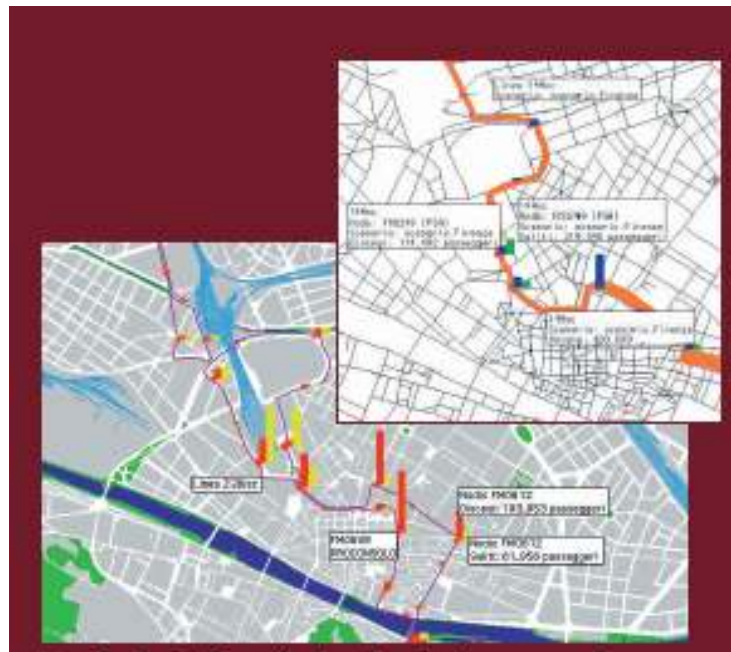


Figura 5.13 Análisis de la movilidad sobre base cartográfica. HYPERPLAN

Las informaciones disponibles son administradas disponiendo de macro de funciones que permiten:

- Importar las informaciones necesarias para la planificación (en caso que estén disponibles en fuentes externas).
- Administrar los elementos que componen la red de transporte con una interfaz cartográfica.
- Controlar automáticamente la corrección de los datos insertados.
- Crear escenarios que contienen diversas hipótesis de planificación.
- Calcular las reparticiones modales: privada y pública.
- Asignar cargas: sobre las redes privada, pública y bimodal.

- Calcular las emisiones de contaminantes.
- Evaluar, visualizar y comparar (textual y gráficamente) los resultados de las simulaciones.
- Imprimir, en modo textual y gráfico, con dispositivos de salida (impresoras, plotters)
- Exportar automáticamente en un formato predefinido los datos de la red y los resultados de las simulaciones.

El modelo matemático implementado es un modelo de equilibrio para la repartición bimodal, basado en un algoritmo para el cálculo de los caminos para la asignación pública, un algoritmo para el cálculo de los caminos para la asignación privada, y una función LOGIT para la repartición bimodal.

Los algoritmos implementados pueden ser utilizados para:

- Ejecutar la repartición modal a partir de las matrices “cautivos de auto”, “cautivos de autobús” e inciertos, produciendo la nueva matriz privada, la nueva matriz pública, las matrices de los estacionamientos y de los desplazamientos bimodales (si hay estacionamientos de intercambio) y los flujos y las velocidades sobre los arcos de la red.
- Ejecutar sólo la repartición entre los estacionamientos a partir de las matrices auto, autobús y bimodal, produciendo la nueva matriz privada, la nueva matriz pública, las matrices de los estacionamientos y de los desplazamientos bimodales y los flujos y las velocidades sobre los arcos de la red.
- Ejecutar sólo la asignación pública o sólo la asignación privada.

Proporcionando los siguientes resultados:

- La repartición modal de las matrices de los desplazamientos (matriz pública, privada y bimodal)
- Las matrices O / D para cada estacionamiento de intercambio.

- Los flujos y las velocidades medias de los vehículos para cada vía, desagregables por O / D
- Los flujos de vehículos en los cruces, desagregables por O / D.
- Los flujos de pasajeros en los medios públicos, desagregables por O / D.
- Los flujos de pasajeros en los recorridos bimodales, desagregables por O / D
- Los tiempos y los costos generales, desagregados por O / D para los desplazamientos privados, públicos y bimodales.
- Las emisiones de contaminantes primarios debidas a los medios de transporte.

Para más información: www.maior.it

5.4.4.4. MinUTP

Es un sistema que modela la demanda de los sistemas de transporte, utilizado por una gran cantidad de gobiernos locales, empresas y universidades para el modelado de las rutas, el análisis de las alternativas y las consecuencias para el medio ambiente, los estudios del impacto del tráfico, y muchos otros temas relacionados. Funciona con cualquier microordenador compatible con IBM usando el sistema operativo de MS-DOS. MinUTP es vendido y comercializado por el grupo de Seiders.

5.4.4.5. TRAMOS

TRAMOS (Traffic and Transport Analysis, Modelling and Optimization System) es un sistema para el análisis, modelado y optimización del tráfico y transporte.

Esta aplicación software integra herramientas tanto de planificación urbana como de otras disciplinas relacionadas con el tráfico y el transporte, cubriendo

las necesidades actuales existentes en la organización y gestión urbana y metropolitana del transporte.

Se trata de un proyecto orientado a la organización, gestión y planificación del transporte, así como a la simulación, en escenarios urbanos y metropolitanos.



Figura 5.14. TRAMOS

Esta compuesto por un conjunto de herramientas diseñadas para estudiar y proponer soluciones a diversos problemas de tráfico y transporte que aparecen en redes urbanas y metropolitanas, la aplicación definitiva incluye:

- ⇒ Estudio de movilidad urbana y metropolitana tanto para transporte público como de transporte privado.
- ⇒ Modelos de cálculo de planes de tráfico.
- ⇒ Estudio de intersecciones.
- ⇒ Simulación microscópica

Este producto integra herramientas de planificación, regulación y control semafórico y simulación, tanto en el ámbito macroscópico como microscópico.



Figura 5.15. TRAMOS: Estudio de Intersecciones

Supone un avance en el campo de la Ingeniería aplicada al Tráfico y al Transporte, al ser el primer software que agrupa un conjunto de herramientas, que en la actualidad sólo se pueden encontrar por separado, destinadas a satisfacer un amplio espectro de necesidades de planificación, gestión y regulación del tráfico en redes urbanas y metropolitanas, incluyendo los siguientes conceptos:

- Análisis de la demanda de la movilidad.
- Representación de la infraestructura con ayuda del ordenador.
- Modelado de la movilidad.
- Elección de modos de transporte.
- Intermodalidad :
 - Simulación en el ámbito microscópico y macroscópico.
 - Control y regulación de tiempos semafóricos. Diseño de planes. Coordinación y sincronización.
 - Simulación de Planes de Control.

Presenta varias funciones aplicables al campo de la planificación y simulación de transporte y tráfico en escenarios metropolitanos. Entre las utilidades del software se encuentran las siguientes:

- ◆ Edición gráfica de redes y de los elementos que componen un escenario. El usuario dispone de una interfaz completa para editar

redes con todos los elementos que componen un escenario metropolitano. Es posible visualizar resultados obtenidos por la aplicación para algunos de los problemas planteados: representación gráfica del flujo del tráfico, velocidad, consumo y saturación en los tramos del viario, rutas mínimas entre orígenes y destinos, mapa escaneado de la ciudad situado como fondo de la red, etc... También permite la importación de escenarios a partir de EMME2.



Figura 5.16. TRAMOS: Edición de redes

- ◆ Planificación de Transporte Público. Una de las herramientas básicas es la planificación de transporte público. Conocidos los datos de viajes entre zonas de la ciudad, el sistema analiza la manera en que se desplazan los usuarios de transporte público, desde un origen a un destino concreto. Incluye un módulo de edición de líneas de autobuses circulantes sobre el escenario de trabajo, con sus frecuencias y horarios de paso en las paradas.
- ◆ Estudio de la movilidad. Muestra como se mueven los vehículos dentro de un escenario metropolitano, determinando el volumen de tráfico en cada tramo del viario. Para ello incorpora recomendaciones sobre la selección de funciones de volumen-retraso en los arcos de la red, facilitando el trabajo de construcción de los modelos.
- ◆ Cálculo de rutas mínimas en la red. Es posible estudiar rutas mínimas de un origen a un destino dentro de un escenario metropolitano, utilizando criterios de tiempo o de distancia.

- ◆ Zonificación de escenarios. TRAMOS estructura un escenario metropolitano en zonas que actúan como fuentes y sumideros de flujos de tráfico. De igual modo la aplicación permite al usuario utilizar múltiples zonificaciones de manera gráfica.
- ◆ Edición de Matrices Origen - Destino. El usuario dispondrá de un modo de edición de matrices Origen - Destino, que representarán la demanda de viajes de una zona a otra de la ciudad dentro de la zonificación definida sobre el escenario creado.
- ◆ Evaluación de la integridad del modelo. Dispone de una funcionalidad excepcional que permite evaluar la integridad del modelo definido para el escenario metropolitano, corrigiendo posibles inconsistencias existentes en el modelo.

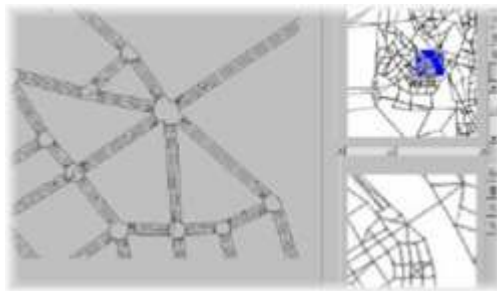


Figura 5.17. TRAMOS: Simulación macroscópica y microscópica.

- ◆ Simulación a nivel macroscópico y microscópico del tráfico. Es posible la realización tanto de simulaciones macroscópicas como microscópicas (en futuras versiones). La simulación de carácter microscópico incorporará adelantamientos, aparcamientos y cambios de carril. Se podrá escoger entre un comportamiento aleatorio del tráfico, determinando el porcentaje de distribución de tráfico en una intersección o simulación basada en las matrices origen-destino, es decir, basada en información proveniente de estudios a nivel macroscópico. La simulación de carácter microscópico incluirá también simulación detallada de intersecciones, con y sin semáforos, simulación de sistemas de información al usuario y guiado dinámico de vehículos.

5.4.4.6. TRANPLAN

TRANPLAN (TRANsplantation PLANning) es un paquete integrado de programas para la planificación del transporte, basado en el modelo de los cuatro pasos para la modelización de la demanda, generación, distribución y asignación de viajes. Utiliza un código y técnicas de análisis similar a las del Departamento de Transporte Público de US. Es bastante fácil de aprender y usar.

5.4.4.7. TransCAD

TransCAD es un sistema de información geográfica (GIS) diseñado especialmente para profesionales de transporte con el objeto de almacenar, mostrar, y analizar datos de transporte.

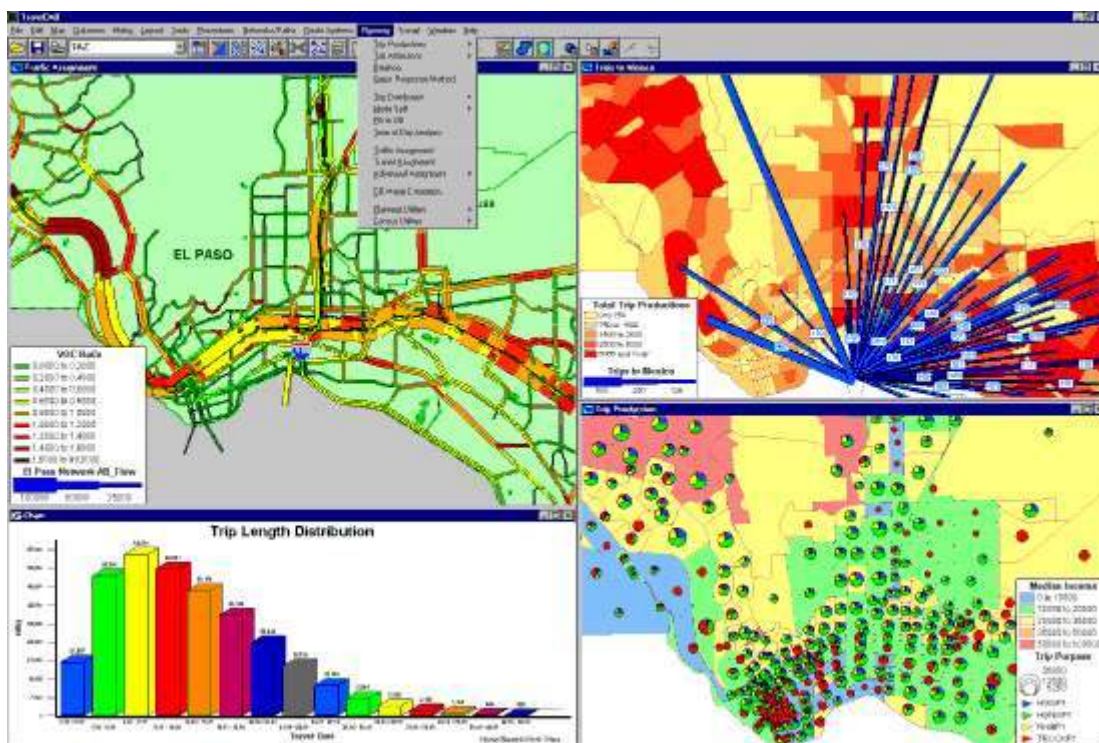


Figura 5.13 TransCAD

Combina en una sola plataforma integrada las propiedades de un GIS y las capacidades de modelación del transporte. Permite la creación y adaptación de mapas, construir y mantener bases de datos geográficos y realizar diferentes tipos de análisis espacial. Incluye sofisticadas características GIS como el diseño de polígonos, áreas de influencia de líneas, y geocodificación, y tiene una arquitectura de sistema abierto que permite el almacenamiento compartido de datos.

5.4.4.8. TRANUS

Es un modelo de simulación integral de la localización de actividades, usos del suelo y de transporte, que puede ser aplicado tanto a escala regional como urbana. Está especialmente orientado a la simulación de los efectos probables de la aplicación de políticas y proyectos diversos en ciudades o regiones, y evaluarlos desde un punto de vista social, económico, financiero, energético y ambiental.

En la planificación integrada es donde el sistema Tranus rinde su potencial máximo, el sistema puede ser utilizado como un modelo sólo transporte, asignando matrices dadas de demanda, lo cual puede ser útil para la evaluación de políticas de transporte a corto plazo. Permite estimar matrices origen-destino de viajes a un costo reducido. Fue el primer modelo integrado o de transporte en contar con una interfaz gráfica Windows. Hoy en día interactúa favorablemente con procesadores de texto, hojas de cálculo, sistemas de información geográficos GIS y modelos de tráfico. A partir de 2005 Modelística liberó la licencia, que pasa a estar ampliamente disponible desde la página Web de manera gratuita. La empresa también ofrece el código para facilitar convenios de colaboración con diversas instituciones de investigación y empresas consultoras bajo las normas de *Open Source*.

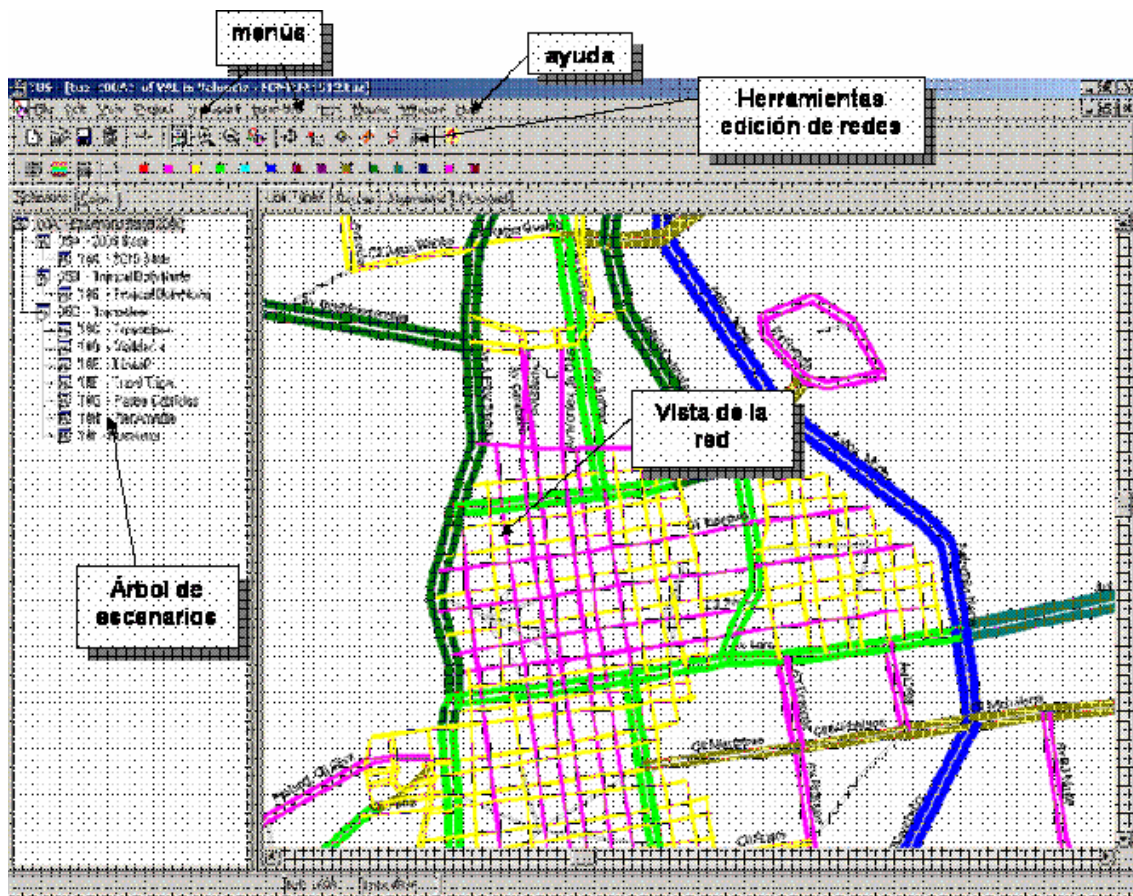


Figura 5.14 TRANUS

Al final de cada iteración el modelo incluye un modelo de oferta de transporte público, en el cual se ajustan las frecuencias de cada ruta en función de los perfiles de demanda. Si la demanda supera la capacidad de una ruta, el tiempo de espera se incrementa. Pero también puede ocurrir que el operador de la ruta decida incrementar la capacidad incrementando la frecuencia, si es que esto le resulta conveniente. La frecuencia de los servicios de transporte público se define con un rango mínimo-máximo. Cuando ambos valores son iguales, indica una frecuencia fija que el modelo no puede variar, independiente del nivel de saturación de las unidades. De lo contrario, cuando se especifica un rango, el modelo de transporte ajusta la oferta a la demanda al final de cada ciclo iterativo. Para ello, la frecuencia de servicio se modifica dentro del rango dado para la siguiente iteración. Las demás características de la ruta permanecen inalteradas, tales como el recorrido, tipo de unidad, tarifa, etc.

Si la demanda supera la oferta, el modelo estima un incremento en los tiempos de espera de los pasajeros que intentan abordar la ruta en los tramos saturados. Además, si existe una diferencia entre la frecuencia mínima y máxima, el modelo estima la posibilidad de que los operadores incrementen la oferta, si es que ello les conviene.

5.4.4.9. TRIPS

TRIPS (TRansport Improvement Planning System) es un paquete para la planificación del transporte que permite establecer distintas estrategias así como un análisis detallados de las redes multimodales del transporte. Permite la implementación de una amplia gama de los modelos para el análisis de la demanda y los distintos recorridos. TRIPS incluye:

- Un lenguaje flexible para la implementación de los modelos de demanda.
- Funciones avanzadas, incorporadas para la ejecución de los modelos estándares.
- Estudio de intersecciones basado en las restricciones de capacidad
- Asignación dinámica del tráfico
- Asignación pública multidireccional del tránsito
- Funciones de estimación de las matrices para el transporte privado y público
- Modelos agregados y desagregados.
- Sistema de gestión del modelo y los datos flexible que visualiza y documenta el proceso de modelación.
- Soporte para tamaños extremadamente.
- Funciona en Windows 95/98/NT/2000.
- Interfaz para utilizar en múltiples idiomas.

5.4.4.10. TP+

TP+ (Transportation Planning Plus) es un paquete para la planificación del transporte muy flexible y funcional. Permite la implementación de gran variedad de modelos de gestión de la demanda, desde el más simple de los cuatro pasos a otros más avanzados y sofisticados. Es muy flexible puesto que permite la entrada de archivos de distintos formatos (ASCII, DBF, binarios...)

Construye enlaces zona a zona (mediante matrices zonales) y asigna los distintos viajes entre ellas penalizando según las restricciones de capacidad.

5.4.5. Modelización del Reparto Modal

El objetivo inicial de la modelización de la Etapa de Reparto Modal es la caracterización de un modelo que permita reproducir el proceso de elección modal que subyace en los datos capturados por la Encuesta y que conformen una "fotografía" de la zona en estudio en el instante de referencia.

La modelización más actualizada corresponde a modelos que reproduzcan, a un nivel de desagregación alto desde el punto de vista del individuo, la etapa de reparto modal obtenida en la Encuesta.

Atendiendo a los aspectos metodológicos, éstos pueden resumirse en las siguientes premisas generales, que dan una visión global del procedimiento de modelización seguido:

- La modelización se basa en la metodología de elección discreta, por lo que los datos de partida para la determinación del modelo de reparto modal corresponden a observaciones individualizadas, y por consiguiente desagregadas.

- Los modelos diseñados determinan, para cada individuo, la probabilidad de elección de un modo de transporte específico; de aquí que el modo de transporte elegido por dicho individuo será aquel, de entre los modelados, que presente un valor de probabilidad más elevado comparativamente con el resto de los modos.
- Al tratarse de un modelo basado en observaciones desagregadas, la escenificación de una situación verosímil exige conocer los parámetros que caracterizan cada observación, de los que el modelo depende por ser función de ellos.
- La obtención de valores agregados, por escenificación de una situación hipotética, exige inicialmente la aplicación del modelo a los individuos que, constituyendo el espacio de observaciones, conforman el universo escenificado; una vez conocida la elección modal para cada uno de los individuos, los valores podrán ser agregados para obtener parámetros globales que den una visión genérica del reparto modal en el escenario considerado.

En esta etapa del proceso de análisis integrado de la movilidad, se deben desarrollar módulos de cálculo especializados en la inferencia de modelos que reproduzcan las pautas de elección modal (es decir, de elección del modo de transporte por parte de los usuarios, ya sea en viajes de una única etapa o en viajes multietapa) implícitas en los datos capturados en las encuestas. La modelización actual debe basarse en la metodología de elección discreta, lo que implica que los datos de partida para la determinación del modelo de reparto modal corresponden a observaciones individualizadas y, por lo tanto, desagregadas. Un criterio matemático práctico para implementar es el clásico de maximización de la utilidad.

La maximización de la utilidad, definida en términos matemáticos como una función de un conjunto de variables medibles y otros parámetros desconocidos,

cuyo valor se puede estimar a partir de una muestra de individuos que ya se hayan enfrentado a este proceso de decisión, permite modelar el proceso de elección modal como el de la elección de aquella alternativa de viaje que posea una utilidad mayor frente a las otras alternativas posibles. Dado que no es posible obtener un modelo capaz de predecir todas las elecciones de los individuos, se recurre al concepto de utilidad aleatoria, cuyo origen se encuentra en el campo de la psicología matemática, y que consiste en admitir que en la vida real no siempre se elige aquello que se puede considerar objetivamente mejor.

5.4.5.1. Clasificación de los modelos de reparto modal

Los modelos de reparto modal pueden ser clasificados en dos grandes familias:

- Modelos de reparto a nivel agregado. Se basan en caracterizar las proporciones de reparto de los usuarios de forma global entre los distintos modos, correlacionando estas proporciones con variables socioeconómicas zonales. Estos modelos ya no se utilizan por su deficiente capacidad modeladora.
- Modelos de reparto desagregados. Para estos modelos, cada usuario de un modo de transporte constituye una observación independiente, del que se podría extraer un modelo propio y específico para él. Cuantas más observaciones se encuentren disponibles, el modelo inferido representará a un mayor número de usuarios. De lo anterior se deduce la denominación de "elección discreta" de estos modelos.

Los fundamentos en los que se basan estos modelos los constituyen la valoración ponderada que cada individuo dé a cada una de las alternativas, cuando se enfrenta a un proceso de decisión.

Esta valoración puede ser establecida de diversas formas, de las que las más comunes son las siguientes:

- Por escalamiento, por la que el encuestado valora cada alternativa según una escala numérica o semántica.
- Por ordenamiento, por la que el encuestado valora cada alternativa ordenándolas de mayor a menor preferencia.
- Por elección discreta, por la que el encuestado elige una de las alternativas que se les presenta (que pueden ser dos, caso más frecuente, o más).

Esta valoración ponderada se basa en definir, para cada una de las alternativas disponibles en la elección, una utilidad como función que estará compuesta de dos términos aditivos, el primero de carácter objetivo cuantificable (costes, tiempos, etc) y el segundo de carácter subjetivo o cualitativo no cuantificable, imposible de medir y de naturaleza no determinista. Centrándonos en este último término, los valores impredecibles que puede alcanzar se representan mediante una variable estadística con una determinada distribución de probabilidad. La forma hipotética de esta distribución de probabilidad determinará el modelo matemático del proceso de elección. Así, si la distribución es:

- Normal: el modelo matemático resultante se conoce con el nombre de **Probit**.
- Weibull-Gumbel: el modelo matemático resultante se conoce con el nombre de **Logit**.

Existen otros modelos, tales como el **Dogit**, basados en otras distribuciones, aunque los más importantes son los dos primeros citados anteriormente. De

ellos, el primero se utiliza exclusivamente en el ámbito académico debido a su complejidad numérica, y es el Modelo Logit el utilizado con práctica exclusividad en el mundo de las aplicaciones prácticas.

5.4.6. Generación de un modelo de red de transporte

El análisis de una red de transporte urbano implica un proceso de abstracción matemática que permita la elaboración de un grafo (conjunto de nodos, arcos e intersecciones con giros impedidos o penalizados) para su posterior informatización y manipulación.

Este proceso engloba los siguientes pasos:

- Modelización de la red viaria y definición de los distintos modos de transporte privados y públicos. Se corresponde con la definición topológica de la red, es decir, con la definición del conjunto de centroides (zonas de transporte generadoras y atractoras de viajes), nodos regulares o de transbordo (para representar intersecciones), arcos (para representar tramos del viario) e intersecciones con giros penalizados o prohibidos que conforma la red viaria. Además de estos aspectos básicos, hay que definir los distintos modos de transporte y establecer una jerarquización del viario, así como definir las prestaciones de cada tramo (funciones de volumen-dempo BPR o cónicas en transporte privado, funciones de costo generalizado en transporte público) en función de sus características (longitud, número de carriles, capacidad por carril, etc., en transporte privado, características propias del medio de transporte en el caso de transporte público, así como percepción ponderada de cada uno de los tiempos que componen un viaje en un modo público e influencia de la congestión global, debida mayoritariamente al transporte privado en el caso de transporte de superficie). Este proceso implica la codificación informática

de la red mediante el GIS con capacidad de transferencia de ficheros al programa comercial de asignación utilizado.

- Simulación de la red: Una vez definida la red, hay que comprobar la fiabilidad del modelo establecido, entendiendo por fiabilidad el grado de concordancia entre dicho modelo y la realidad que pretende representar. Para ello es necesario "cargar" el modelo de red con las matrices O-D de viajes para obtener resultados previos representativos que permitan estimar la bondad del modelo por contraste con la realidad observada. Si este contraste es aceptable, se considera que la red se encuentra correctamente calibrada; en caso contrario, el modelo deberá modificarse adecuadamente a fin de aproximarlos más a la realidad. El proceso de calibración es un aspecto en el que debe hacerse especial hincapié, pues lo normal será partir de una red ya construida y con múltiples deficiencias, siendo la detección y corrección de éstas un primer paso obligado.

- Calibrado de la red: Esta fase tiene como objetivo la obtención de un modelo de la red de transporte lo más fidedigno posible con respecto a la realidad y caracterizado por un comportamiento funcional adecuado y libre de errores que se ajuste aceptablemente a las observaciones efectuadas. El proceso consta, básicamente, de los siguientes pasos:
 - Identificación y contraste de caminos mínimos, en longitud y tiempo.
 - Contraste de las velocidades medias sobre vías pertenecientes a los distintos subconjuntos jerárquicos y seleccionadas por su importancia y representatividad.
 - Contraste de los volúmenes obtenidos en la simulación previa de la red con las intensidades reales. Estos volúmenes se expresarán en términos de vehículos equivalentes para los

modos de transporte privado y de pasajeros para los modos de transporte públicos.

5.4.6.1. Ajuste de matrices O-D de viajes

Una matriz O-D de viajes es una tabla de doble entrada (orígenes y destinos) en la que el elemento genérico representa el número de viajes que se producen entre la zona origen i y la zona destino j . Es decir, es una estructura de información que recoge la demanda de transporte en el área objeto de estudio durante el período temporal considerado. Las matrices O-D de viajes son una fuente ingente y rica de información, y constituyen un dato imprescindible para cualquier estudio de movilidad, de ahí la importancia de su correcta estimación.

La práctica habitual y cotidiana en los trabajos de consultoría, en lo tocante al clásico problema de Ajuste de Matrices O-D de Viajes, se centra actualmente en metodologías basadas en esquemas no lineales de programación matemática, entre los cuales cabe destacar las técnicas de mínimos cuadrados (EMME/2, SATURN) y las de máxima verosimilitud (TRIPS), siendo esta última una técnica un tanto obsoleta. El método que se debe utilizar se encuadra en el marco de las formulaciones de mínimos cuadrados.

Las técnicas de mínimos cuadrados empleadas en la práctica profesional moderna se basan en la actualización de una matriz previa (generalmente, aquella obtenida en la encuesta domiciliaria) en términos de minimizar una función cuadrática que cuantifica la discrepancia existente en cada momento entre los volúmenes de tráfico teóricos y los volúmenes observados (ya sean de vehículos equivalentes en transporte privado, o de viajeros en transporte público). Estas técnicas permiten llevar a cabo procesos de encuestación menos exhaustivos, con el fin de obtener una matriz previa que defina aproximadamente la estructura de la matriz final a estimar, de forma tal que se reduce considerablemente el número de errores y el de problemas de

manipulación y comprobación de datos, ya que dicha encuesta se realiza sobre una muestra de todo el universo considerado. Por su parte, la obtención de los datos procedentes de los aforos automáticos y de los conteos sube-baja se realiza con un bajo coste presupuestario.

5.4.7. Prognosis de la movilidad en el horizonte del Plan.

Toda planificación tiene un plazo de vigencia, periodo en el que se producirán modificaciones en los parámetros socioeconómicos que se han considerado para ajustar los modelos.

El modo habitual de realizar la prognosis de las variables socioeconómicas es mediante extrapolación de las tendencias de crecimiento de una serie temporal de valores de las mismas lo más amplia posible.

La obtención de modelos nunca será el fin último de un proceso de análisis de la movilidad en áreas urbanas. La auténtica razón de ser de dichos modelos es su futura explotación. Los modelos de Generación - Atracción - Distribución, los modelos de Reparto y las Matrices O-D Ajustadas conforman un conjunto de datos de muy difícil manipulación. Es fundamental disponer de una herramienta que proporcione dinamismo a la utilización de los modelos con vistas a su explotación práctica en prognosis de escenarios futuros.

5.5. Evaluación de alternativas

En esta etapa se pretenden alcanzar varios objetivos:

- Racionalizar la oferta de transporte. Coordinar los distintos servicios, jerarquizar la red y reducir las superposiciones de oferta innecesarias.

- Armonizar territorialmente las condiciones de accesibilidad al transporte colectivo. Eliminar situaciones de inaccesibilidad, corregir desequilibrios de cobertura territorial, diversificar los destinos centrales y mejorar las relaciones transversales.
- Mejorar la calidad del servicio. Mejorar la regularidad, los niveles de ocupación y las condiciones de transbordo.

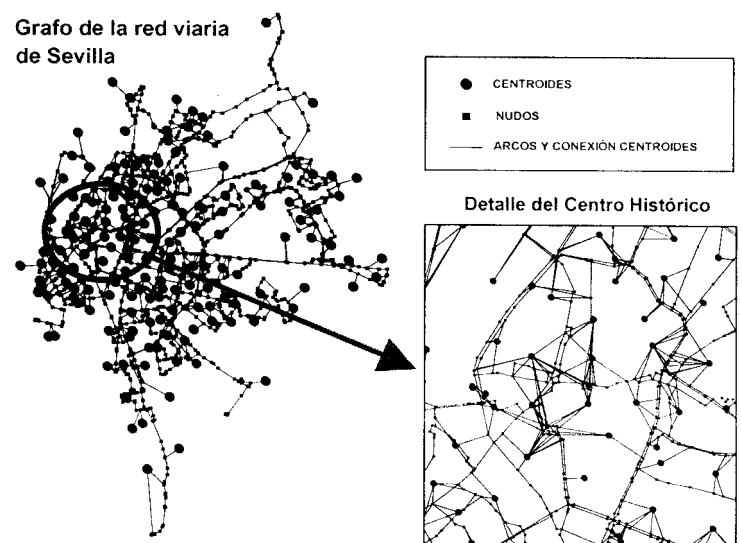


Figura 5.16 Grafo de la red viaria de Sevilla

Se procede a una comparación de las alternativas frente al escenario 0, y se analizan los distintos tipos de rentabilidad:

- análisis funcional de las alternativas.
- Análisis coste-beneficio (coste de inversión y explotación frente a beneficios traducidos a unidades monetarias)
- Análisis de rentabilidad económica o empresarial (costes de inversión y explotación frente a ingresos)
- Análisis multicriterio (además de las variables monetarizables, incluso de variables cualitativas, con distinta ponderación)

Se definen una serie de indicadores para medir la eficiencia y la rentabilidad:

- ◆ Indicadores funcionales:
 - Producción (kms, horas, flota)
 - Viajeros (viajeros totales, viajeros/km, viajeros/bus, etc.)
 - Coste (ingresos, tarifa media, cuenta de resultados, etc.)
 - Funcionamiento (transbordos, etapas medias, etc.)
 - Tiempos (coste generalizado medio, tiempo medio de viaje, distancia media de viaje, etc.)
- ◆ Indicadores de política de transportes y adaptabilidad a desarrollos y demandas vecinales.
- ◆ Indicadores medioambientales (emisiones, ruidos, etc.)

Como resultado del proceso de planificación se obtienen los itinerarios de la red de líneas, los niveles de oferta y la previsión de la demanda. La definición final del servicio exige la asignación de recursos mediante la planificación habitual. (Trabajo de campo para la localización de las paradas, mediciones de longitud, tiempo de vuelta, etc.). El control y seguimiento de las líneas es fundamental para ajustar los niveles de oferta (vueltas perdidas, volumen de demanda, coches completos, etc).