

CAPÍTULO 3

INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE TRANSPORTE

- 3.1. Introducción a los modelos de transporte.**
- 3.2. Tipología general de modelos.**
- 3.3. Delimitación del área de estudio.
Zonificación.**
- 3.4. Recogida de información.**
- 3.5. Elaboración de la matriz de movilidad.**
- 3.6. Modelos de Demanda de Transporte.**
- 3.7. Modelos de Producción
(Generación/Atracción) de viajes.**
- 3.8. Modelos de Distribución Espacial de la
Demanda.**
- 3.9. Modelos de Distribución Modal de la
Demanda.**
- 3.10. Modelos de Redes de Asignación.**
- 3.11. Prognosis de la demanda de transporte y
de la utilización de infraestructuras.**

3.1. INTRODUCCIÓN A LOS MODELOS DE TRANSPORTE.

Un modelo de transporte es una representación simplificada del mundo real, normalmente implementada en computadoras, las cuales describen el impacto de decisiones de transporte. Los modelos de transporte pueden cubrir países, ciudades o áreas de diferentes tamaños. Estos, permiten soluciones alternativas a los problemas para ser testados antes de gastar recursos en acometer alguna reforma.

Los modelos pueden ser usados para:

- Crear sistemas de control del tráfico para ver la respuesta ante cambios en los transportes.
- Ayudar a entender la amplia gama de impactos que pueden resultar de un proyecto de transporte.
- Evaluar costes y beneficios para así priorizar las inversiones.

Las decisiones de invertir en transporte urbano son normalmente hechas para mejorar la calidad de vida de la gente, a través de, por ejemplo:

- Mejoras medioambientales.
- Mejorar la economía de un área.
- Mejorar la eficiencia en el transporte.

Las decisiones que se tomen tendrán unas repercusiones de manera inmediata en lo que afecta a los pasajeros: cambios de tiempo, modo o rutas de viaje; pero, sin duda, también habrá repercusiones a largo plazo, afectando en el uso del suelo futuro, en la economía, etc.

En el marco de un proceso de planificación del transporte se pretende dar respuesta a preguntas tales como:

- Cuál será la red de metro que mejor puede atender a la demanda actual y futura de una aglomeración.

- Cómo funcionará una nueva línea de metro, tranvía o autobús en una red existente. Y como se vería esta modificada.
- Cómo funcionará la red arterial en una aglomeración urbana.
- Cuál será el efecto de un cinturón de circunvalación o una variante en el tráfico urbano.
- Cómo incidirá en el tráfico el cierre o peatonalización de una vía.
- Cuál será la mejor alternativa de actuación en un corredor entre las diversas posibilidades existentes: desdoblamiento, variantes de núcleos urbanos, etc.

Con el diseño y ajuste de modelos de transporte, se pretende elaborar un conjunto de "herramientas" y procesos de análisis y evaluación que permiten dar respuesta o aportar información para contestar a dichas preguntas.

Según el tipo de herramientas empleadas para la simulación, se suele hablar de dos alternativas: **modelo secuencial** y **modelo de equilibrio simultáneo**. Ambos modelos, corresponden al modelo clásico de transporte de cuatro etapas y se diferencian en la forma de abordar la resolución de cada una de las etapas.

El primer tipo de modelo utiliza un algoritmo en el que cada etapa es abordada secuencialmente, mientras que el segundo tipo de modelo resuelve tres de las etapas en forma simultánea. Ambos tipos de modelos tienen en común los requerimientos de definición y calibración de los distintos submodelos involucrados. Entre estos requerimientos comunes se debe mencionar la modelación adecuada de la demanda, la calibración de redes, el tratamiento del transporte público y otros.

La implementación de cualquiera de los dos tipos de modelos necesitan como datos de entrada, entre otros, las matrices de generación y atracción de viajes a nivel zonal.

El modelo clásico de transporte está compuesto por cuatro submodelos que reflejan las distintas etapas de la demanda y oferta de transporte: los tres

primeros modelos o etapas corresponden a la demanda de transporte y son: generación/atracción de viajes, distribución de viajes y partición modal. La última y cuarta etapa es la de asignación correspondiendo a la oferta de transporte.

3.2. TIPOLOGÍA GENERAL DE MODELOS.

Con los modelos de transporte se trata de explicar cómo se produce la demanda actual, en general a través de expresiones en forma matemática, en las que se apoyará la prognosis de la demanda futura.

En los años sesenta se desarrollaron las primeras versiones del clásico **modelo secuencial de cuatro etapas**, que hasta la fecha es el modelo más extensamente usado en las más diversas ciudades del mundo. Este modelo trabaja sobre la hipótesis de que el usuario realiza secuencialmente un conjunto de elecciones que caracterizan sus viajes, en base a ciertos atributos personales y al sistema de transporte. Éstas son:

- Elige viajar o no.
- Elige su destino.
- Elige el medio de transporte.
- Elige el itinerario.

que dan lugar a los siguientes grupos de modelos:

- Modelos de generación de tráfico o de movilidad general. Explican los viajes que se producen en una zona en función de variables socioeconómicas de la zona.
- Modelos de distribución zonal. Explican la distribución espacial de viajes; hacia qué zonas se dirigen los viajes producidos en cada zona.

- Modelos de distribución modal. Explican la elección de modo: de los viajes que se producen en una relación origen-destino, cómo se repartirán en los modos que sirven a la relación.
- Modelos de asignación. Explican el itinerario que elegirá cada usuario en cada relación en el modo elegido anteriormente.

Pese a su popularidad, el modelo secuencial presenta serios problemas en ciertos escenarios, particularmente cuando es aplicado en sistemas de transporte congestionados.

El desarrollo teórico llevó entonces – a principios de los ochenta- a la formulación del llamado **modelo de equilibrio simultáneo**.

Este nuevo enfoque conceptual, básicamente postula que la operación del sistema de transporte es el resultado de un proceso de equilibrio entre la demanda (generación, distribución y partición modal) y la oferta (asignación) de transporte. Demanda y oferta, están intrínsecamente relacionadas, se influyen mutuamente y no pueden ser determinadas separadamente. Ello conduce a la formulación de un problema matemático bastante más complejo que el correspondiente problema asociado al modelo secuencial, pero también claramente superior, tanto en términos de su fundamentación conceptual, como de su mayor capacidad predictiva y de la bondad de sus resultados.

En el contexto de una ciudad de tamaño medio, donde normalmente la congestión no existe o es de escasa importancia, el analista debería preferir el modelo secuencial, fundamentalmente debido a su mayor facilidad operacional y computacional.

3.3. DELIMITACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO. ZONIFICACIÓN.

Todo el proceso de planificación del transporte tiene, lógicamente, una referencia espacial, donde se localizan las infraestructuras o los servicios que se planifican.

Por ello, el proceso de planificación tiene una tarea previa que es la delimitación del Área de Estudio y su zonificación.

Para la delimitación del Área de Estudio se tendrá en cuenta el área de influencia de la infraestructura de transporte que se pretende analizar.

El objetivo de la zonificación es configurar una base espacial para referencia de los flujos de viajes y de las variables explicativas a utilizar.

El nivel de desagregación en la zonificación dependerá del problema (infraestructura que se analiza) y del ámbito o área de estudio. En un Plan Regional de Carreteras, la zonificación será el municipio y agrupaciones de municipios; en el Estudio de una Red Arterial, la zonificación será el municipio que, en numerosas ocasiones, se dividirá en varias zonas; en el Estudio de una actuación en viario urbano, la zonificación será el barrio y aún divisiones de éste.

En la zonificación se debe procurar que:

- a) Las zonas sean homogéneas.
- b) Se delimiten de acuerdo con las redes de transporte y con existencia de barreras.
- c) Sea compatible con otras zonificaciones existentes: municipios, barrios, secciones censales, etc.

El número de zonas es una definición delicada. A mayor número de zonas, el análisis de transporte es más preciso y detallado, pero también son mayores los requerimientos del modelo y de la información necesaria. Por otro lado, un número demasiado pequeño de zonas podría conducir a análisis demasiados agregados, reñidos con los objetivos de un estudio de transporte. Por ejemplo, un número demasiado reducido de zonas tendrá como consecuencia unas áreas zonales muy grandes (difícilmente homogéneas) lo que a su vez redundará en un gran número de viajes intrazonales; dado que la unidad de análisis básico es la zona, los modelos de asignación no pueden tratar tales viajes, y el análisis completo pierde verosimilitud.

Es recomendable que la zonificación distinga adecuadamente aquellas zonas singulares de la ciudad. Ello se justifica porque normalmente no poseen un

comportamiento de viajes similar al de otras zonas preferentemente residenciales, comerciales o industriales. Sería aconsejable tratar como zonas independientes: estaciones de ferrocarril, estadios, universidades, centros comerciales, Hospitales, etc.

3.4. RECOGIDA DE INFORMACIÓN.

Si con los modelos de transporte pretendemos explicar cómo se produce la demanda de transporte, un dato básico es conocer ésta con la mayor exactitud posible y las variables que la pueden explicar.

Esto lleva consigo una amplia recogida de información, en cada uno de los aspectos de Demanda, Oferta y Variables explicativas.

- A) Recogida de información sobre demanda de transporte.

Objeto:

Cómo se mueven las personas y las mercancías dentro del Área de estudio, a fin de estimar la movilidad.

Datos básicos a recoger para cada viaje:

- ✓ Origen y destino del viaje.
- ✓ Motivo o mercancía transportada.
- ✓ Modo de transporte.

Formas básicas de recogida de información:

- ✓ Encuestas Domiciliarias:

Se recoge información sobre los viajes que han realizado los miembros de la familia investigada durante un día determinado: motivo del viaje, modos de transporte utilizados, coste del viaje, etc.

Así mismo, se suele recoger información sobre las características y composición de la familia, lugares de

trabajo y estudio, posesión de vehículo, nivel de renta, etc.

Es útil recordar que el tamaño de una muestra para estimar el valor de una variable, puede determinarse utilizando la expresión:

$$n = \frac{C^2 \cdot Z^2}{E^2}$$

donde:

n: Tamaño de la muestra.

C: Coeficiente de variación de la variable a estimar.

E: Nivel de confianza (expresado en tanto por uno).

Z: Valor de la distribución normal para un nivel de confianza y una tolerancia de error determinados.

Para utilizar esta expresión – propuesta por Smith, M.E. en 1979 – es necesario definir con precisión la variable a ser estimada y conocer su coeficiente de variación, lo cual puede representar un problema, pues éste, a priori, no es conocido. Pero para efectos de determinar el tamaño de la muestra, es posible utilizar información histórica, sin incurrir en errores importantes. En cualquier caso, siempre es posible verificar la estimación del coeficiente de variación después de recogida la muestra, y de ser necesario, aumentar su tamaño. O bien – como es lo habitual- tomar una muestra un poco mayor de la calculada, para prever estos y otros posibles errores.

Normalmente un nivel de confianza del 90% con un 5% de error es aceptable.

✓ Encuestas Origen-Destino.

Se realizan para un modo determinado, y a los usuarios que se desplazan en ese momento, con la intención de conocer algunas características básicas de sus viajes, como: origen-destino, propósito y horario.

En general, para determinar el tamaño muestral se puede utilizar la siguiente expresión (Ortúzar y Willumsem, 1994):

$$n \geq \frac{p \cdot (1-p)}{\left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{p \cdot (1-p)}{N}}$$

donde:

n es el número de pasajeros a encuestar.

p es la proporción de viajes con un destino determinado.

e es el nivel de error (expresado como una proporción).

z es la variable Normal estándar para el nivel de confianza requerido.

N es el tamaño de la población (esto es, el flujo observado de pasajeros en el punto de control).

Para **N**, **e** y **z** dados, el valor de **p**=0.5 produce el valor más conservador (mayor) de **n**; así, tomando este valor y considerando **e**=0.1 (esto es un error máximo del 10%) y **z**=1.96 (corresponde a un nivel de confianza del 95%), se puede obtener el tamaño de la muestra requerido en función del flujo horario, tal como se indica en el siguiente cuadro:

Flujo Horario Estimado	Tamaño Muestral
900 o más	10,0 (1 de cada 10)

700 a 899	12,5 (1 de cada 8)
500 a 699	16,6 (1 de cada 6)
300 a 499	25,0 (1 de cada 4)
200 a 299	33,3 (1 de cada 3)
0 a 199	50,0 (1 de cada 2)

Para alcanzar este objetivo en el caso de transporte privado, es necesario definir un conjunto de puntos de medición que cubran razonablemente la mayor cantidad posible de parejas origen-destino de viajes. La elección de estos puntos dependerá esencialmente de las características topológicas de la red, por lo que no es posible hacer recomendaciones generales, quizás, tan solo indicar que la definición de estos sea estricta en el sentido de que se capte la totalidad de los viajes que acceden o salen de una determinada zona. Aproximadamente se estima que debieran elegirse entre 10 y 30 puntos de realización de encuestas.

- ✓ Complementariamente se recogerá información sobre la utilización de las redes, a través de conteos y aforos:
 - Aforos de vehículos que cruzan un cierto punto
 - Conteos de viajeros subidos y bajados por parada y línea
 - Conteo de vehículos que realizan un cierto movimiento
 - Etc.

B) Recogida de información sobre oferta de transporte.

Objeto:

Caracterizar la oferta de transporte como dato básico para su modelización.

Se apoyará en:

✓ Inventario de redes:

Características físicas y geométricas de redes viarias, Itinerarios, paradas y frecuencias de servicio en redes de transporte público.

✓ Mediciones de velocidad y/o tiempo de recorrido

Gran parte de esta información la tienen los organismos con competencia en las infraestructuras, así como los operadores, si bien suele ser necesario una recogida de información complementaria a través de trabajo de campo: mediciones de velocidad y tiempo de recorrido, condiciones de funcionamiento real de las infraestructuras viarias, etc.

C) Recogida de información sobre datos socioeconómicos.

Objeto:

Recoger información para el posterior ajuste de modelos de generación y atracción.

Lo ideal sería referir los datos a niveles espaciales lo más desagregados posibles. Algunos de estos son:

- Población por sexo y edad.
- Población activa por actividad.
- Empleo por actividad.
- Dotaciones escolares según niveles.
- Dotaciones médico-hospitalarias: número de médicos, camas hospitalarias.

- Dotaciones comerciales: establecimientos comerciales, m² de venta en comercios de grandes superficies, etc.
- Características y dimensiones de grandes centros generadores y atractores de tráfico: Aeropuertos, Recintos FERIALES, Polígonos Industriales, Centros de Transporte, etc.
- Nivel de motorización / Nivel de renta.

D) Planes vigentes urbano y / o regional.

Objeto:

Permitir la prognosis de las variables explicativas de la movilidad: población, empleo, dotaciones, grandes centros, etc., a los años horizonte.

Algunos de los datos a recoger deberían ser:

- Planes Generales de Ordenación Urbana (ámbito urbano).
- Planes o Esquemas Territoriales (ámbito regional).

3.5 ELABORACIÓN DE LA MATRIZ DE MOVILIDAD.

El objeto básico de las Encuestas es obtener la matriz de movilidad expresiva de la demanda de transporte entre cada par de zonas consideradas en la zonificación.

En la explotación de las Encuestas cabe diferenciar tres actividades básicas:

- a) Codificación de encuestas.
- b) Cálculo de coeficientes de expansión.
- c) Obtención de matrices de movilidad parciales.

En la codificación, se trata de traducir a datos numéricos la información recogida en la encuesta, siendo particularmente interesante la codificación del origen y destino del viaje, que se apoya en la zonificación del área de estudio y en los códigos de zona que se hayan definido para cada zona.

En el cálculo del coeficiente de expansión se trata de establecer, dado que se ha encuestado a sólo una parte de las familias, vehículos y usuarios (muestra), el coeficiente de paso de la muestra al universo (total de familias, vehículos y usuarios).

En las Encuestas Domiciliarias, el coeficiente de expansión vendrá definido por zona, a través del coeficiente:

$$\frac{\text{Familias residentes en la zona}}{\text{Familias encuestadas en la zona}}$$

En las Encuestas Origen-Destino a vehículos, el coeficiente de expansión vendrá dado por la expresión general:

$$\frac{\text{Vehículos del tipo } X \text{ aforados en el período } h}{\text{Vehículos del tipo } X \text{ encuestados en el período } h}$$

En las Encuestas Origen-Destino a usuarios del transporte público, el coeficiente de expansión vendrá dado por la expresión general:

$$\frac{\text{Usuarios subidos en la parada } p \text{ de la línea } l \text{ en el período } h}{\text{Usuarios encuestados en la parada } p \text{ de la línea } l \text{ en el período } h}$$

A cada encuesta realizada se le asignará un coeficiente de expansión que traduce los datos a nivel Muestra al Universo objeto de investigación.

Con las encuestas así codificadas se obtendrán las matrices expresivas de la movilidad a diferentes niveles:

- Viajes de personas residentes en el área de estudio en cada modo de transporte, en la Encuesta Domiciliaria.
- Flujos de vehículos por tipo de vehículo, referidos al universo Vehículos que pasan por el punto de encuesta, en las Encuestas Origen-Destino a vehículos.
- Viajes de personas por línea de transporte, en las Encuestas Origen-Destino a usuarios del transporte colectivo.

A partir de estas encuestas se obtendrán las matrices de movilidad globales:

- a) Por modos de transporte, de forma directa y completa, a partir de la Encuesta Domiciliaria.
- b) Para el modo de transporte objeto de investigación, de forma indirecta (exige eliminar viajes con trasbordo dentro del modo) y completa a partir de la Encuesta a usuarios a un modo de transporte público determinado.
- c) Para movilidad por carretera, de forma indirecta (exige un tratamiento específico para los viajes potencialmente encuestables en más de un punto de encuesta) e incompleta (no se captarán la totalidad de relaciones a partir de las Encuestas Origen-Destino a vehículos).

Por otra parte, estas matrices de movilidad se pueden obtener por motivo de viaje, período horario, tipo de vehículo, etc. que permiten caracterizar completamente la demanda de transporte.

3.6. MODELOS DE DEMANDA DE TRANSPORTE.

Conocidas las matrices de movilidad por modo de transporte que, en principio consideramos completas (derivadas por tanto de una Encuesta Domiciliaria) se trata de elaborar un modelo o conjunto de modelos, concebidos básicamente como expresiones matemáticas, que permitan explicar los viajes que se producen en la actualidad, y los que se producirán en el futuro, entre cada par de zonas **i** y **j**, en un modo determinado **m**, en función de datos de la actividad socioeconómica de las zonas **i** y **j** y de los costes de transporte entre **i** y **j**, tanto en el modo **m** como en el resto de los modos.

Existen dos tipos básicos de modelos:

- Directos.
- Secuenciales.

En los modelos directos se integra, en una misma ecuación, las variables que se consideran deben tenerse en cuenta.

Su fórmula general es:

$$N_{ij}^m = f (VS_i^k, VS_j^k, CT_{i-j}^m, CT_{i-j}^n)$$

donde:

N_{ij}^m Viajes entre **i** y **j** en el modo **m**.

$VS_i^k, VS_j^k, k = 1,2, \dots, n$, Variables socioeconómicas expresivas de la actividad económica en las zonas **i** y **j**.

$CT_{i,j}^m$ Costes de transporte en el modo **m** entre **i** y **j**.

CT_{ij}^m Costes de transportes, $n \neq m$, en el resto de los modos entre **i** y **j**.

Un modelo simplificado de este tipo, referido a movilidad por carretera, es:

$$N_{ij} = k \frac{(P_i \cdot P_j)^\alpha}{C_{ij}^\beta}$$

N_{ij} Viajes por carretera entre i y j.

P_i y P_j Parque en las zonas i y j.

C_{ij} Coste de transporte entre i y j (Distancia, Tiempo o Coste)

k , α y β constantes a ajustar por regresión lineal, mediante su transformación en una expresión lineal:

$$\ln N_{ij} = \ln K + \alpha \ln (P_i \cdot P_j) - \beta \ln C_{ij}$$

En los modelos secuenciales, la demanda de transporte se explica a través de tres modelos:

- Modelos de producción de viajes (Modelos de Generación / Atracción de viajes).

Determinan, a base de información socioeconómica y de población, los viajes producidos (O_i) y los viajes atraídos (D_j) por cada una de las zonas de análisis en que se divide el área de estudio.

- Modelos de distribución zonal (Modelos Distribución).

Estos modelos construyen una matriz de viajes (T_{ij}) entre parejas origen-destino de zonas.

- Modelos de distribución modal (Modelos de Partición Modal).

El modelo de Partición Modal, divide los viajes entre los distintos modos de transporte disponible (T^m_{ij}).

A continuación se analizarán los modelos anteriormente expuestos, aunque sin entrar en demasiado detalle, pues en estas páginas no se pretende

más que hacer una breve introducción a la metodología para el análisis de sistemas de transporte en las ciudades.

3.7. MODELOS DE PRODUCCIÓN (GENERACIÓN / ATRACCIÓN) DE VIAJES.

Estos modelos constituyen la primera etapa de los modelos de transporte.

A partir de las matrices de movilidad, obtenidas a partir de la Encuesta Domiciliaria, se tendrá el número de viajes generados y atraídos por zona de transporte, para el total y cada uno de los modos de transporte.

Por razones metodológicas, las generaciones de viaje (orígenes) son modeladas independientemente de las atracciones de viajes (destinos), aunque evidentemente sus resultados deben ser consistentes (la suma de viajes generados en todas las zonas, debe coincidir con la suma de todos los viajes atraídos por cada una de las zonas).

Por otra parte, dado el mayor desarrollo conceptual de los modelos de generación de viajes, habitualmente se tiende a confiar más en sus resultados y por lo tanto, normalmente se ajustan las atracciones a las generaciones de viajes.

Una manera simple de realizar este ajuste, es calcular un factor de corrección para cada propósito de viaje, de la siguiente manera:

$$f_p = \frac{\sum_i \sum_n O_i^{pn}}{\sum_j D_j^p}$$

Y luego se multiplica este factor por las componentes del vector de destinos del propósito correspondiente, obteniéndose los valores ajustados:

$$D_j^{p(a)} = f_p \cdot D_j^p$$

Dos tipos de modelos se utilizan para explicar la producción de viajes:

- Modelos lineales (Regresión Lineal).
- Modelos de análisis por categorías.

La elección de uno u otro, depende de las características de los viajes cuyos orígenes o destinos se desea explicar. Si bien los modelos de análisis por categoría son conceptualmente más adecuados, su ámbito de aplicación se reduce básicamente a aquellos viajes originados en el hogar. Por otra parte, aunque los modelos de regresión lineal no son especialmente adecuados para explicar la generación de viajes, en casos tales como las atracciones de viajes y las generaciones de viajes no originados en el hogar, suelen ser la única herramienta metodológica disponible para estudiarlos.

3.7.1. MODELOS DE GENERACIÓN DE VIAJES:

En relación con la generación de viajes, en la terminología habitualmente utilizada en planificación de transportes, debe considerarse:

Viajes basados:

Aquellos que tienen en uno de los extremos, bien el origen, bien el destino, el domicilio de quien viaja.

Viajes no basados:

Ni el origen ni el destino del viaje coincide con el domicilio.

En los viajes basados en el domicilio se considera que la zona de generación de viajes es la zona donde se localiza el domicilio y la zona de atracción la contraria.

En viajes no basados en el domicilio se considera el viaje generado por la zona origen y atraído por la zona de destino.

Las generaciones de viajes más relevantes pueden diferenciarse en tres tipos: generación de viajes basados en el hogar de ida, generación de viajes basados en el hogar de retorno, y generación de viajes no basados en el hogar. Los primeros serán estimados mediante modelos de Análisis de Clasificación Múltiple (ACM), en tanto que para los segundos y terceros se pueden utilizar modelos de regresión lineal múltiple (RLM). Es decir, los viajes originados en una zona pueden ser expresados como sigue:

$$O_i^{pn} = O_{i(bhi)}^{pn} + O_{i(bhr)}^{pn} + O_{i(nbh)}^{pn}$$

donde:

O_i^{pn} = Número total de viajes con propósito p , producidos por usuarios de la categoría n , en la zona i .

$O_{i(bhi)}^{pn}$ = Número de viajes basados en el hogar de ida (bhi), para la misma clasificación anterior.

$O_{i(bhr)}^{pn}$ = Número de viajes basados en el hogar de retorno (bhr), para la misma clasificación anterior.

$O_{i(nbh)}^{pn}$ = Número de viajes no originados en el hogar para la misma clasificación anterior.

Generación de Viajes basados en el Hogar de Ida (bhi).

Para los viajes originados en el hogar, la metodología más utilizada confía en la determinación de ciertas **tasas de generación de viajes** por hogar, y el conocimiento del número de hogares en una determinada zona. Estas tasas deben ser conocidas dentro de cada período de análisis, para cada propósito de viaje y categoría del hogar.

$$O_{i(bhi)}^{pn} = H_i^n \cdot t^{pn}$$

donde:

$O_{i(bhi)}^{pn}$ = Número de viajes con propósito p generados por los hogares de la categoría n de la zona i .

H_i^n = Número de hogares de la categoría n en la zona i .

t^{pn} = Tasa de generación de viajes con propósito p de los hogares de la categoría n .

Así pues, este modelo requerirá conocer el número de hogares por categoría en cada zona, lo cual deberá ser estimada o determinado a partir de información socioeconómica: normalmente el Censo Poblacional.

Luego, el problema queda reducido a encontrar las tasas de generación de viajes para cada categoría de hogar y propósito. Esta tarea ha sido habitualmente realizada con los denominados modelos de **análisis por categorías**, los cuales determinan las tasas de generación buscadas a partir de una muestra de hogares, simplemente dividiendo para cada categoría ingreso-tasa de motorización, el número de viajes observados de un propósito por el número de hogares en la muestra.

A pesar de sus ventajas teóricas, la aplicación práctica de este modelo presenta problemas importantes, siendo bastante común la obtención de resultados contrarios a lo que la experiencia nos indica. Además, es difícil calificar la bondad estadística de estos modelos.

Fue lo anteriormente expuesto lo que provocó una variación del modelo, dando lugar al modelo de **análisis de clasificación múltiple (ACM)** que se basa en el valor de una tasa media global para todas las categorías y en las tasas medias de cada nivel en que se particionan las distintas variables de categorización; solucionándose en gran medida los problemas del modelo anterior.

Generación de Viajes Basados en el Hogar de Retorno (bhr).

La generación de este tipo de viaje (más frecuentes en el período fuera de punta), debe ser modelado con regresión lineal múltiple (RLM) a nivel zonal.

Este tipo de viajes será función de variables asociadas con el uso del suelo y las actividades de una zona. Lógicamente, el número de hogares no será una variable explicativa, puesto que el origen del viaje no es el hogar; es por ello que el método ACM es inaplicable.

La generación de viajes debe clasificarse por categoría de demanda, de modo que se plantean dos alternativas. La primera consiste en calibrar un modelo RLM por categoría, mientras que la segunda consiste en calibrar un

modelo RLM que no distingue categorías y aplicar posteriormente factores que representen adecuadamente la proporción de cada tipo de usuarios.

La primera alternativa es la más deseable, sin embargo su utilización y grado de fiabilidad está limitado por el número de viajes observados en cada categoría de demanda. Es por ello que este método puede ocasionar problemas de calibración y probablemente sea difícil obtener modelos de RLM estadísticamente robustos. La segunda alternativa, requiere conocer el porcentaje de viajes basados en el hogar de retorno, generados por zona de acuerdo a la clasificación de demanda.

Generación de Viajes No Basados en el Hogar (nbh).

La generación de viajes no basados en el hogar debe ser modelado con regresión lineal múltiple (**RLM**) a nivel zonal.

La generación de estos viajes, será función de variables asociadas con el uso de suelos y las actividades de una zona.

Al igual que los anteriores, deberá calibrarse un modelo RLM por categoría, pudiéndose presentar los problemas antes mencionados.

3.7.2. MODELOS DE ATRACCIÓN DE VIAJES.

Las atracciones de viajes son modeladas a nivel zonal, lo que normalmente implica que sólo serán explicadas por período y propósito, pero no por categoría socioeconómica.

Nuevamente es recomendable considerar al menos dos alternativas:

- La primera de ellas, aplicable a viajes atraídos basados en el hogar de ida (bhi) y viajes no basados en el hogar (nbh).

Las variables explicativas corresponden normalmente a equipamientos por zonas y no los hogares (ninguno de estos viajes tiene por origen el hogar).

En estos casos se utilizarán modelos de regresión lineal múltiple.

- La segunda es aplicable para modelar la atracción de viajes basados en el hogar de retorno (bhr). En este caso, el destino del viaje es el hogar, y por lo tanto la única variable explicativa posible será el número de hogares por zona. En este caso es posible utilizar la técnica de regresión lineal simple (RLS), o los modelos de tasas ACM, para modelar estos viajes.

El modelo de regresión lineal múltiple, tan mencionado en estas líneas, tiene la forma típica siguiente (aplicándolo en este caso a la atracción de viajes):

$$D_j^p = \theta_0 + \sum_k \theta_k \cdot X_{jk} + E_j$$

donde:

D_j^p = Número de viajes con propósito **p** atraídos por la zona **j**.

θ_k = Parámetros de calibración.

X_{jk} = Variables explicativas zonales.

E_j = Error de la estimación para la zona **j**.

Estos modelos estiman el número de viajes atraídos por una zona, suponiendo una relación lineal de esta variable con ciertas características de la zona, denominadas variables explicativas.

Variables explicativas:

Las variables explicativas de los modelos de RLM serán casi las mismas tanto en los modelos de *generación de viajes basados en el hogar de retorno* y en los *no basados en el hogar*, como en los *modelos de atracción de viajes*. Algunas de ellas, según el propósito del viaje son:

- Viajes con propósito de trabajo:

Estos son atraídos por las actividades que ofrecen empleo:

- ✓ Comercios.

- ✓ Oficinas.
- ✓ Servicios.
- ✓ Industrias.
- ✓ Población activa.
- ✓ Empleo por sectores.
- Viajes con propósito de estudio:
 - ✓ Puestos escolares.
 - ✓ Puestos universitarios.
- Viajes con otros propósitos: viajes por compras, por salud, etc.
 - ✓ Nivel de renta.
 - ✓ Camas hospitalarias.

Si los viajes generados y atraídos se refieren a un único modo, vehículo privado, el nivel de motorización (parque) por zonas, también es una variable básica a introducir.

Asimismo, en el análisis, se puede diferenciar, en algún caso, entre viajes de familias propietarias de coche y de familias no propietarias de coche.

En cuanto a los Modelos de análisis por categorías, indicar que son generalmente empleados en el estudio de la generación, considerando a la familia como la unidad generadora de viajes, las cuales se clasifican en categorías definidas a través de intervalos de ciertas variables (renta, nivel de motorización, tamaño de la familia, distancia al C.B.D. desde su domicilio, etc.), obteniéndose a través de la explotación de la encuesta, los índices de viajes generados por cada categoría de familia para cada motivo de viaje.

Un análisis similar se puede realizar para la atracción, considerándose, en este caso, como unidad atractora las industrias según los tipos, los servicios, etc.

3.8. MODELOS DE DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA DEMANDA.

Estos modelos constituyen la segunda etapa en los modelos de transporte.

A partir de los vectores de orígenes y destinos estimados en la etapa anterior, el modelo de distribución tiene como objetivo construir una matriz de viajes entre cada par origen-destino de zonas.

En general las técnicas utilizadas son:

1. Método de factores de crecimiento.

No es un modelo propiamente dicho, pues no explica el reparto espacial de viajes, sino que básicamente extrapola los flujos actuales en función del crecimiento de la población y la actividad económica en las zonas. Es decir, modifica la matriz de viajes actual, en función del crecimiento de algunas variables, como puede ser el crecimiento demográfico.

Éste es un modelo muy usado para modelos interurbanos.

Su formulación general es:

$$N_{ij}^1 = F_{ij} N_{ij}^0$$

N_{ij}^0 Viajes entre i y j en el año 0.

N_{ij}^1 Viajes entre i y j en el año 1.

F_{ij} Factor de crecimiento en la relación i-j.

El factor de crecimiento puede ser:

1) Constante para todas las relaciones y zonas.

$$N_{ij}^1 = F N_{ij}^0$$

2) Se tienen factores de crecimiento diferentes por zonas F_i .

a) Media aritmética a nivel de relación.

$$N_{ij}^1 = \frac{F_i + F_j}{2} N_{ij}^0$$

b) Media geométrica (Método Detroit).

$$N_{ij} = \frac{F_i \cdot F_j}{F} N_{ij}$$

F factor de crecimiento global de la aglomeración.

c) Método Fratar.

$$N_{ij}^1 = N_{ij}^0 F_i \cdot F_j \frac{\sum_j N_{ij}^0}{\sum_j N_{ij}^0 \cdot F_j}$$

Para garantizar las condiciones de contorno:

$$G_i^1 = \sum_j N_{ij}^1 = F_i G_i^0 = F_i \sum_j N_{ij}$$

$$A_j^1 = \sum_i N_{ij}^1 = F_j A_j^0 = F_j \sum_i N_{ij}$$

El método se aplica de forma iterativa, utilizando aplicaciones informáticas.

El método es simplista (no es en realidad un modelo explicativo), pues no tiene en cuenta las modificaciones que se producen entre los instantes 0 y 1 en:

- a) Estructura de la aglomeración.
- b) Redes de transporte.
- c) Comportamiento de los usuarios.
- d) Fronteras entre zonas.

Da buenos resultados para prognosis a corto plazo, siempre que la aglomeración evolucione poco.

2. Modelos sintéticos:

Distribuyen los viajes generados a zonas destino usando funciones matemáticas que incluyen el coste de viajes entre zonas.

2.1 Modelos gravitatorios o gravitacionales.

El modelo más utilizado en la actualidad es el **modelo gravitacional** (Wilson, A.G.)

El principio básico de estos modelos es que el flujo N_{ij} entre dos zonas i y j , es proporcional a la totalidad de viajes generados en la zona origen i , a la totalidad de viajes atraídos por la zona destino j , y decrece con la distancia que les separa o coste de transporte.

$$N_{ij} = g_i \cdot a_j F(c_{ij})$$

g_i generación de la zona i .

a_j atracción de la zona j .

$F(c_{ij})$ función decreciente de la fricción, dificultad o coste de relación entre i y j .

En los modelos aplicados a un solo modo de transporte, el factor fricción, habitualmente empleado, es el denominado coste generalizado de transporte:

$$C_{ij} = a t_{ij} + b d_{ij} + c p_{ij}$$

t_{ij} tiempo de viaje entre i y j .

d_{ij} distancia de viaje entre i y j .

p_{ij} precio del viaje entre i y j

Mientras que si el modelo se aplica a varios modos de transporte, el factor fricción será el coste generalizado ponderado

$$C_{ij} = \sum p_k C_{ij}^k$$

p_k porcentaje de viajes en el modo k en la relación i-j.

C_{ij}^k coste generalizado de transporte en la relación i-j en el modo k.

Las formulaciones más típicas empleadas en los modelos gravitacionales son las siguientes:

a) Función potencial

$$N_{ij} = \alpha \frac{g_i \cdot a_j}{C_{ij}^\beta}$$

b) Función exponencial

$$N_{ij} = \alpha g_i \cdot a_j e^{-\beta C_{ij}} \cdot C_{ij}^{-\gamma}$$

o su simplificada:

$$N_{ij} = \alpha g_i \cdot a_j e^{-\beta \cdot C_{ij}}$$

El parámetro α , se suele denominar *factor de equilibrio*, y asegurará que la suma de todos los viajes generados en cada una de las zonas i, coincide con la suma de todos los viajes atraídos por cada una de las zonas j. El parámetro α , será determinado a través de un método iterativo.

Es muy probable que los valores calculados no satisfagan las condiciones de contorno, pues en principio, en los resultados que ofrece el modelo:

$$a_i \neq \sum_j N_{ij}$$

$$g_i \neq \sum_j N_{ij}$$

Por lo que es preciso proceder a correcciones, utilizando, por ejemplo, el método de los mínimos cuadrados, o mediante iteraciones sucesivas, hasta asegurar que sean mínimas las diferencias, a nivel zonal, entre los viajes generados y atraídos observados, y los derivados del modelo.

Algunos paquetes informáticos permiten el ajuste de este modelo con matrices incompletas como son las derivadas de Encuestas Origen-Destino. Ello exige que se señale, específicamente, aquellas relaciones completamente captadas, a las que se ajusta el modelo gravitatorio elegido.

En un segundo paso, y a través de un proceso iterativo en el que se parte de los viajes generados y atraídos de la matriz incompleta, se calculan los viajes en las relaciones no captadas, e incrementando sucesivamente los viajes generados y atraídos hasta que las desviaciones entre los viajes observados en las relaciones totalmente captadas y los simulados por el modelo sean mínimas.

Este proceso permite obtener una matriz completa y hallar, a partir de ella, los viajes generados y atraídos por zonas, que serán utilizados para el ajuste de los modelos de generación y atracción.

Así pues, los pasos a seguir son:

- 1.- Ajustar el modelo gravitatorio por la técnica de matriz incompleta.
- 2.- Obtener la matriz completa y los viajes generados y atraídos por zonas.

3.- Se ajustan los modelos de generación y atracción.

2.2 Modelos de oportunidad.

El modelo presupone que el comportamiento de los viajeros de la aglomeración es tal que todo viajero procedente de i termina su viaje en j , siempre que no haya encontrado un destino aceptable en una zona más conveniente para él que la j (el sentido de conveniencia puede referirse a mayor proximidad geográfica, menor tiempo de viaje, o menor coste generalizado de transporte).

De acuerdo con la hipótesis anterior, si A_j es el número total de destino ofrecido por la zona j , habrá que definir una función $f_i(A_i)$ para cada zona de origen que nos dé la probabilidad de que en j haya un destino aceptable para i ; una vez definida esta función, si el número total de destinos existentes en las zonas más próximas a i que j es A_T , llamando T a la zona total que engloba dichas zonas, la probabilidad de que un viaje con origen en i acabe en j será el producto:

$$(1 - f_i(A_T)) \times f_i(A_j).$$

(Probabilidad de que no haya destino aceptable en T)

$\times$ (Probabilidad de que haya destino aceptable en j)

La función f_i adoptada por el modelo de oportunidad es:

$$f_i(A) = 1 - e^{-L_i A}$$

Obteniéndose como valor de N_{ij} el siguiente:

$$N_{ij} = G_i \cdot e^{-L_i \cdot A_T} \cdot (1 - e^{-L_i \cdot A_j})$$

Teniendo G_i y A_j el mismo significado que en el modelo gravitacional y siendo A_T la totalidad de viajes atraídos por las zonas más interesantes para i que la j .

3.9 **MODELOS DE DISTRIBUCIÓN MODAL DE LA DEMANDA.**

Estos modelos constituyen la tercera etapa de los modelos de transporte.

El modelo de partición modal divide la matriz de viajes provenientes de la etapa de distribución, en tantas matrices como modos de transporte existan disponibles para los usuarios. Un modelo de partición modal será necesario para cada categoría de demanda, propósito de viaje y período de análisis.

La hipótesis subyacente de este tipo de modelos es que *la probabilidad de que un individuo escoja una alternativa determinada es función de las características (socioeconómicas) del individuo y de lo atractivo que resulte cada opción.*

Existen modelos para calcular la distribución modal basados en la comparación de los costes generales de las distintas alternativas disponibles. El método más común para modelar la distribución modal se basa en el uso de la teoría de la utilidad aleatoria y en elegir modelos discretos, en los cuales los diferentes modos de transporte están caracterizados por sus costes, y donde se calcula la probabilidad de usar cada uno de estos. La elección de modos puede ser desde una elección simple binaria, como por ejemplo entre el coche o el transporte público, o una elección múltiple entre, por ejemplo, el coche, el autobús, el tren y el metro. La elección múltiple puede ser representada de un modo alternativo a través de una serie de elecciones jerárquicas.

Los modelos más extendidos son:

1) Modelos tipo logit multimodal.

En la actualidad el modelo *logit* es el más extendido.

En estos modelos, el tanto por uno p_k de captación de cada modo k en una relación entre dos zonas, i, j , viene dado por la expresión:

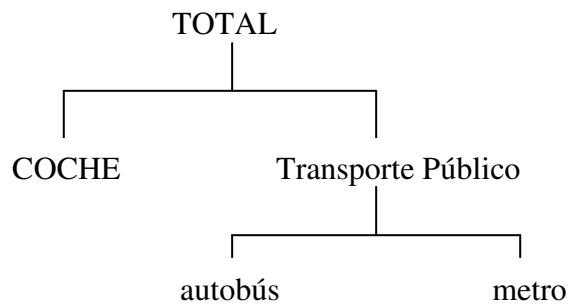
$$p_k = \frac{e^{-\alpha_k C_k}}{\sum_{k=1}^n e^{-\alpha_k C_k}}$$

donde:

α_k son los parámetros a determinar en el ajuste.

C_k los costes generalizados de cada modo k , para la citada relación i, j .

Como variantes de este método se pueden aplicar modelos de reparto por parejas de modos, en vez de para todos los modos en competencia, simultáneamente.



También es común tomar un modo de transporte de referencia y como variables explicativas las diferencias de coste generalizado respecto a éste.

Por ejemplo, para una logit binaria (sólo se considera la elección de dos opciones), la proporción de viajes entre las zonas origen/destino ($i \neq j$), se podría obtener mediante la siguiente logit:

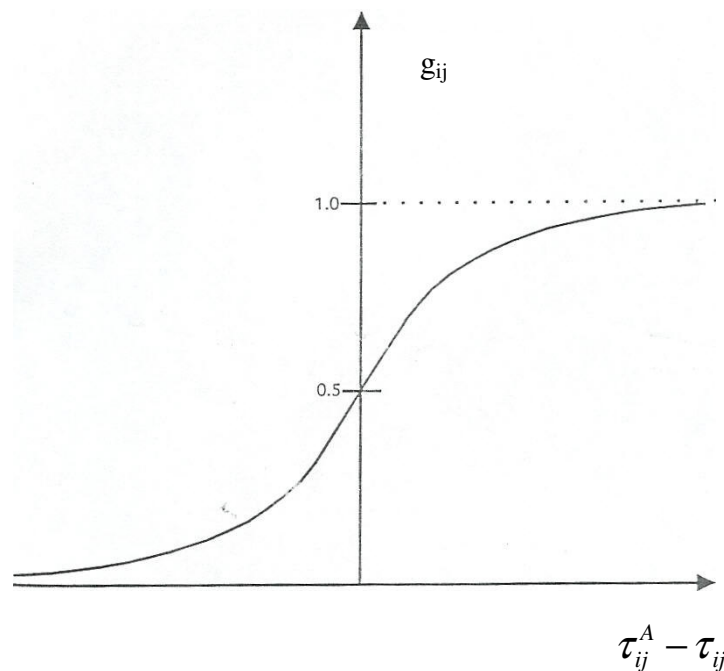
$$g_{ij} = \frac{1}{1 + e^{-\gamma(\tau_{ij}^A - \tau_{ij})}}$$

donde:

τ_{ij} es el tiempo transcurrido en el camino más corto que conecta los dos nodos (zonas).

τ_{ij}^A es tiempo transcurrido en el camino más corto que conecta los nodos usando el medio de transporte alternativo.

γ es un parámetro que deberá ser calibrado.



2) Modelos tipo probit.

Estos modelos se basan en considerar el valor del tiempo de viaje como una variable estadística con una determinada función de distribución. Frecuentemente, se acepta que esta variable sigue una ley logarítmico-normal de media μ y desviación típica σ . Calculando los valores límites del tiempo que igualan los costes generalizados de los diferentes modos en competencia y conociendo el valor de μ y de σ , se obtienen, a través de la citada función, las participaciones de los diferentes modos en la demanda de transporte de que se trate. En efecto, sean C_1 , C_2 , C_3 los costes de transporte en los modos 1, 2 y 3, respectivamente (si se consideran tres modos de transporte, aunque el método es generalizable), y t_1 , t_2 y t_3 los tiempos de viaje en dichos modos. Supongamos que sea $C_1 < C_2 < C_3$ y $t_1 > t_2 > t_3$.

Los valores límites del tiempo serán:

- Entre el modo 1 y el 2:

$$C_1 + p_{1,2} t_1 = C_2 + p_{1,2} t_2$$

de donde

$$p_{1,2} = (C_2 - C_1) / (t_1 - t_2)$$

- Análogamente, entre el modo 2 y 3, el valor límite del tiempo $p_{2,3}$ será:

$$p_{2,3} = (C_3 - C_2) / (t_2 - t_3)$$

La demanda para la que el valor del tiempo sea inferior a $p_{1,2}$ utilizará el modo 1, la que tenga su valor entre $p_{1,2}$ y $p_{2,3}$ utilizará el modo 2 y la que tenga un valor superior a $p_{2,3}$ empleará el modo 3. En consecuencia, las participaciones p_1 , p_2 , p_3 será:

$$p_1 = \int_{-\infty}^{p_{1,2}} f(x)dx \quad p_2 = \int_{p_{1,2}}^{p_{2,3}} f(x)dx \quad p_3 = \int_{p_{2,3}}^{\infty} f(x)dx$$

donde $f(x)$ es la función de densidad del valor del tiempo z .

Si se acepta la distribución logarítmico-normal, una transformación de variables y el uso de las tablas $N(0,1)$ permiten efectuar el ajuste en la fase de reglaje del modelo y obtener las participaciones p_i en la fase de pronosis.

3) Modelos de elasticidad. Estos modelos tienen una expresión matemática del tipo:

$$t_{m,ij} = T_{ij} C_{1,ij}^{a_{m,1}} \cdot C_{2,ij}^{a_{m,2}} \cdot C_{3,ij}^{a_{m,3}} \cdot t_{1,ij}^{b_{m,1}} \cdot t_{2,ij}^{b_{m,2}} \cdot t_{3,i,j}$$

donde:

$T_{m,ij}$ demanda total de viaje en el modo m, para la relación i,j.

T_{ij} demanda de viaje entre i,j en todos los modos.

$C_{1,ij}$, $C_{2,ij}$, $C_{3,ij}$ costes de viajes entre ij, en los modos 1, 2 y 3, respectivamente.

$t_{1,ij}$, $t_{2,ij}$, $t_{3,ij}$ tiempos de viaje entre ij, en los modos 1, 2 y 3, respectivamente.

$a_{m,n}$ elasticidades de la demanda del modo m respecto al coste del modo n.

$b_{m,n}$ elasticidades de la demanda del modo m respecto al tiempo de transporte en el modo n.

El ajuste del modelo consiste en estimar los valores de dichas elasticidades.

4) Modelos de utilidad.

En ellos se parte de que la utilidad del transporte $U_{m,ij}$ entre i,j en el modo m es:

$$U_{m,ij} = C_{m,ij}^{a_m} \cdot t_{m,ij}^{b_m} \cdot e^{d_m}$$

con

$$T_{m,ij} = S_{m,ij} \times T_{ij}$$

y

$$S_{m,ij} = U_{m,ij} / U_{ij}$$

Teniendo las $C_{m,ij}$, $t_{m,ij}$, $T_{m,ij}$ y T_{ij} los mismos significados que en el caso anterior y siendo $S_{m,ij}$ la participación del modo m, en tanto por uno, en la demanda total T_{ij} y $U_{ij} = \sum U_{m,ij}$ la utilidad total.

El ajuste, como en el caso anterior, consistirá en obtener los valores de a_m , b_m , d_m de modo que las diferencias entre los valores observados y los estimados sea mínima.

5) Simplificación.

En estudios de redes viarias, tanto urbanas como interurbanas, no integradas en estudios integrales de transporte, se suele estudiar específicamente la movilidad en vehículo privado, eliminando modelos de reparto modal.

Una vez definida la probabilidad de que un usuario de la categoría n elija el modo m para viajar en el par (i,j) , el número de viajes en ese modo se obtiene multiplicando dicha probabilidad por el número total de viajes en ese par.

El modelo de participación modal es la última de las etapas que se incluyen dentro de lo que se denomina la *demanda de transporte*.

El resultado final de la demanda es una matriz de viajes por modo entre cada par origen-destino.

3.10 MODELOS DE REDES DE ASIGNACIÓN.

Constituye la cuarta y última etapa en los modelos de transporte.

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

3.10.1 MODELIZACIÓN DE LA RED.

El proceso de asignación requiere, además de una matriz que recoja los desplazamientos que se producen, una descripción completa del sistema de transporte existente.

A partir de la red viaria real, se selecciona un grafo, que garantice todos los posibles itinerarios coherentes entre cada par de centroides.

Centroide es la representación, en la red, del origen o el destino de un viaje. Un viaje entre zonas se convierte en una relación entre centroides.

La modelización de la red supone la descripción de ésta de acuerdo con unas normas, las propias del programa informático que se emplee y que, en general, suelen ser:

- ✓ Nudos extremos del arco.
- ✓ Distancia entre nudos.
- ✓ Velocidad o tiempo de viaje.
- ✓ Tipo de infraestructura.
- ✓ Tipo de vía.
- ✓ Tipo de área atravesada.

El ajuste de la red consiste en comprobar que los itinerarios que permite establecer la red modelizada se corresponden con la realidad, a través de la obtención de los caminos de coste/tiempo/distancia mínimos desde una serie de centroides seleccionados, y su comprobación con los realmente seguidos por los usuarios.

Los caminos pueden ser:

- ✓ de tiempo mínimo t_{ij}
- ✓ de distancia mínimo d_{ij}
- ✓ de coste generalizado mínimo $c_{ij} = a t_{ij} + b d_{ij}$

Al finalizar el proceso de ajuste se tiene una descripción de la red objeto de análisis, manipulable informáticamente en base a programas de cálculo de caminos mínimos, de los que se puede obtener matrices de coste generalizados mínimo interzonal a utilizar en los modelos de distribución zonal.

3.10.2 MODELOS DE ASIGNACIÓN.

Estos modelos traducen la demanda de transporte, explicitada por una matriz de viajes, en la utilización de la red, expresada por el número de viajes que utiliza cada arco de la red.

Los objetivos de la asignación de tráfico como parte del proceso de planificación son:

- Conocer las deficiencias en el actual sistema de transporte.
- Evaluar los efectos de las mejoras y las extensiones al sistema.
- Evaluar las necesidades futuras mediante la asignación de la previsión futura de viajes.
- Establecer las prioridades de construcción, asignando estimaciones de viajes para años intermedios.

Métodos de asignación.

1. Todo o nada.

En los modelos de asignación todo o nada se asigna la totalidad de viajes en cada relación $i-j$ al camino de tiempo, distancia o coste generalizado mínimo; asumiendo que el tiempo de viaje y coste es independiente del flujo sobre tramos.

En redes urbanas, en las que existen entre cada par de zonas caminos alternativos muy similares, en los que en realidad se reparte el tráfico, el modelo todo o nada tiende a sobrecargar ciertos itinerarios y a descargar otros, no ofreciendo buenos resultados.

Una mejora de este sistema de asignación es el método Burrell, que es una asignación todo o nada, en la que se considera que el tiempo de viaje asignado a cada arco es un tiempo medio que los usuarios perciben con una desviación típica, de forma que cuando se construye el camino mínimo se establece el tiempo de viaje a través de un proceso

aleatorio, en que el valor medio es el establecido en la red y la desviación típica la que se defina específicamente. Mediante este proceso es posible que los itinerarios entre dos parejas de zonas, que por el camino mínimo tendrían gran parte del itinerario común, tengan caminos diferentes o con parte comunes menores.

2. Asignación estocástica a caminos alternativos (técnica Dial).

Supone una mejora sobre el método anterior.

En este método, se definen entre cada par de zonas dos o más caminos alternativos, repartiéndose el flujo existente en dicha relación entre dichos itinerarios, teniendo en cuenta el tiempo mínimo y el tiempo por cada uno de los itinerarios.

Cualquiera de estos métodos no tiene en cuenta la capacidad de las vías, pudiendo asignar tráficos a ciertos arcos, superiores a la capacidad de la vía. Un método que introduce este efecto es el siguiente.

3. Asignación por etapas con restricción de capacidad (curvas intensidad - velocidad).

En este caso, la asignación se realiza en varias etapas, variando al final de cada etapa, las condiciones de funcionamiento del arco (tiempo de viaje) en función de la carga asignada y de la capacidad de la vía que representa el arco.

Ello exige en el proceso de modelización, tipificar cada arco de acuerdo con unos parámetros:

- ✓ Número de carriles
- ✓ Tipo de intersecciones: a desnivel, a nivel, a nivel semaforizado, etc.
- ✓ Entorno: rural, suburbano, urbano.

✓ Calzada: única o desdoblada.

de forma que se le pueda asignar una curva tipo Intensidad-Velocidad, que en función de la carga asignada permite obtener la velocidad media de circulación.

En este método, la operativa simplificada es como sigue:

- a) Se asigna, todo o nada o por el método Dial, el total de la matriz de viajes o un porcentaje de ésta.
- b) Se analiza, arco por arco, la carga asignada y en función de ésta y la curva Intensidad-Velocidad correspondiente, se asigna una nueva velocidad.
- c) A la red con las nuevas velocidades se le vuelve a asignar la matriz de viajes, bien en su totalidad, bien en un porcentaje de ésta.

Dentro de este método existen tres posibles sistemas de obtención de las cargas por arco:

- a) Incremental
- b) De Volumen Medio
- c) De Equilibrio

En el método Incremental se asigna, en la primera iteración, un porcentaje p_1 de la matriz de viajes. En base a los resultados de la asignación, se obtiene para cada arco la nueva velocidad, en función de las citadas curvas Intensidad-Velocidad, a la vez que queda precargado con el volumen asignado. Se repite de nuevo la asignación, con un porcentaje p_2 , analizando la carga del arco derivada de la precarga p_1 y la asignación p_2 , y se vuelve a modificar la velocidad de recorrido, repitiendo el proceso de asignación con un porcentaje p_3 , hasta que $p_1 + p_2 + \dots + p_n = 100$.

En el método de Equilibrio, se repite el proceso de asignación n veces. En cada asignación se asigna la matriz completa de viajes y se modifica la velocidad de recorrido. Como resultado de asignación se

considera la última asignación. Este sistema presupone que se consigue al final un equilibrio entre asignaciones y velocidades.

En el método de Volumen Medio, con una sistemática similar al de Equilibrio (en cada asignación se asigna el total de la matriz), la carga por arco viene dada por unos porcentajes preestablecidos de las asignaciones realizadas en cada iteración.

4. Asignación a caminos alternativos mediante curvas de reparto.

Suponiendo que entre cada par de zonas existen, al menos, dos caminos alternativos, con sus propias características de tiempo, distancia, nivel de servicio (por ejemplo utilizando y sin utilizar la autopista de peaje, o una variante importante de trazado), y repartiendo los viajes a uno u otro itinerario en función de curvas de reparto, preestablecidos y que definen el porcentaje por uno u otro itinerario en función de variables tales como:

- ✓ Tiempo de viaje ahorrado
- ✓ Distancia ahorrada
- ✓ Razón de tiempos de viaje
- ✓ Razón de distancias de viaje
- ✓ Tiempo de viaje y distancia ahorrados
- ✓ Razón entre distancias y velocidades

curvas que deben ajustarse en base a las observaciones de reparto que se producen en otra áreas o corredores similares.

Cada método de asignación tiene un campo concreto de aplicación en función de las características de la red a la que se asigna y el problema que se pretende analizar y evaluar.

En redes interurbanas se utilizarán, básicamente, modelos de asignación todo o nada o estocásticos. (Método Dial).

En redes urbanas se utilizarán modelos de asignación por etapas con restricción de capacidad y, en menor medida, el método Burrel.

En corredores interurbanos, con itinerarios alternativos (autopistas de peaje, variantes importantes), curvas de reparto.

Lógicamente, en una primera fase de ajuste del modelo de asignación, en el que se comparan los resultados derivados de la asignación y los aforos observados, se produce un nuevo ajuste en la red modificando y completando la red.

3.11 PROGNOSIS DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE Y DE LA UTILIZACIÓN DE LAS INFRAESTRUCTURAS.

Tal y como se señaló, el objetivo de estas herramientas es el conocer cómo funcionarán en el futuro actuaciones en infraestructuras que se planteen.

Para ello, se aplican las herramientas ajustadas en un proceso, en el que cabe diferenciar las siguientes etapas:

- Prognosis de las variables explicativas.
 - ✓ Población.
 - ✓ Empleo.
 - ✓ Nivel de motorización.
 - ✓ Renta.
 - ✓ Dotaciones.
 - ✓ Etc.

- Prognosis de la movilidad global.
 - ✓ Análisis de la evolución de la movilidad en el pasado en relación con ciertas variables (Parque, Renta, etc.).
 - ✓ Hipótesis de crecimiento global de tráfico, estableciendo:
 - Crecimiento máximo

- Crecimiento mínimo
- Crecimiento más probable
- Prognosis de la movilidad a nivel de zona.
 - ✓ Generación y atracción de viajes, en cada zona, por aplicación de modelos de generación y atracción de viajes, con las variables explicativas futuras.
 - ✓ Ajuste de los datos a nivel zonal con la evolución global. (Generados y atraídos por zonas).
- Prognosis de la movilidad por zonas (para todos los modos o un modo en particular).
 - ✓ Aplicación de los modelos de distribución zonal
 - ✓ Modelos de factores de crecimiento, con generados y atraídos futuros.
 - ✓ Modelos gravitatorios, con generados y atraídos por zonas y costes generalizados futuros.
- Prognosis de movilidad zonal por modos. (Básico en Estudios Integrales de Transporte).
 - ✓ Aplicación de los modelos de reparto modal, determinadas las características futuras de cada uno de los modos en competencia y obtenidos los costes de transporte futuros en cada modo a partir de los modelos de red.
- Prognosis de utilización de redes.
 - ✓ A través de modelos de asignación, asignando a las redes futuras las matrices futuras de demanda.

Proceso que culminará con la Evaluación de Alternativas a partir de los datos obtenidos en las etapas anteriores.