

TESIS DOCTORAL

**INSTRUMENTOS Y METODOLOGÍA DE PLANES DE
MOVILIDAD Y TRANSPORTE EN LAS CIUDADES MEDIAS
COLOMBIANAS**

AUTOR

Ing. Diego Alexander Escobar García

DIRECTOR

Dr. Manuel Herce Vallejo

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

**DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUCTURAS DEL TRANSPORTE Y
DEL TERRITORIO**

PROGRAMA DE DOCTORADO

**“GESTIÓN DEL TERRITORIO E INFRAESTRUCTURAS DEL
TRANSPORTE”**

**Con el apoyo de Programa ALBAN “Programa de Becas de Alto
Nivel de la Unión Europea para América Latina”**

BARCELONA, FEBRERO DE 2.008

**CAPÍTULO 4. LA METODOLOGIA DE DEMANDA EN LA
PLANIFICACIÓN DEL TRANSPORTE Y LA MOVILIDAD URBANA**

INTRODUCCIÓN

Los métodos de planificación del transporte urbano de personas han sido objeto de investigación desde los años cuarenta del siglo XX, dando origen a una rama disciplinar propia dentro de la ingeniería civil; conformada primero en torno a la denominada ingeniería de tráfico y, más tarde, a la economía del transporte.

El origen de estos estudios se sitúa en torno a la preocupación por la construcción del espacio del automóvil, una vez que éste fue aceptado como el instrumento más potente de transporte urbano. Esta época es coincidente con la aparición en la urbanística del movimiento moderno (elaborado sobre los CIAM); de forma que el espacio del automóvil acabó por conformar la propia estructura urbana de nuestras ciudades y, sobre todo, garantizar su continuada expansión.¹

Los primeros estudios de Tránsito se deben, como es bien sabido, a VOORHEES, MITCHEL y RAPKIN²; que pudieron constatar una relación directa entre el número de viajes producidos entre dos zonas, el número de empleos en una de ellas y el número de residentes en la otra, así como una relación disuasoria de la distancia.

Esa relación entre transporte y usos del suelo era coherente con un urbanismo que preconizaba la separación del uso del suelo por zonas exclusivas, que iba a provocar el nuevo fenómeno del “commuting”, o de los viajes pendulares residencia-trabajo, recurrentes en su comportamiento espacial y temporal.

La evolución posterior del enfoque de la planificación del transporte ha seguido en la misma línea conceptual marcada por aquellos primitivos modelos de tipo gravitatorio, hasta alcanzar en la actualidad una sofisticación matemática, apoyada en gran parte por la enorme facilidad de cálculo que ha introducido la informática. Su difusión ha sido casi universal, alcanzando una enorme importancia en el mundo de la planificación de redes viarias y de transporte; y, por tanto, están presentes en estos supuestos en las ciudades colombianas.

Por eso, este capítulo indaga en lógica de esos métodos, en la filosofía con que enfrentan el problema y en sus consecuencias sobre la planificación del transporte, buscando ver su validez para enfrentar los actuales retos de la movilidad urbana.

¹ HALL, P. Ciudades del mañana. Ediciones del Serbal, Barcelona, 1998.

² CECARELLI, P. Las incógnitas del tráfico urbano. Ed. G.Gili, Barcelona, 1976

4.1. EL ENFOQUE DE DEMANDA DEL TRANSPORTE URBANO.

Las redes de infraestructuras alteran la geografía de un territorio. Los caminos son los ejes de penetración, *de ruptura de la fricción que el propio espacio opone al movimiento*; por eso la cobertura de las redes de transporte de un territorio determina la organización de éste, estableciendo corredores con características diferenciales de resistencia a su penetración, que, en la medida que admiten distintas velocidades, provocan gradientes discontinuos de esa penetración, como en el caso de los ferrocarriles o las autopistas con salidas limitadas.

Las redes están generadas por la existencia de relaciones entre los puntos, pero la *característica reticular esencial* es que las *relaciones se expresen a través de flujos*, sean de transporte, de información o de energía; estas se manifiestan materialmente a través de las infraestructuras físicas de las redes. De esta manera se plantea una dialéctica entre la red virtual, de posibilidades de relaciones entre actores; y la red real, de materialización de esas relaciones entre los puntos del espacio.³

La noción de red, asociada a una visión de la ciudad como un *sistema estable de actividades relacionadas entre sí*, en forma que su comportamiento global depende de esas relaciones, ha sido una constante en el planeamiento y dimensionado de las redes de infraestructuras desde los años sesenta; aunque durante un largo periodo de tiempo el enfoque se ha puesto en las actividades como demandadoras de relaciones y, por tanto, como variable que predeterminaba la forma y nivel de servicio que debería alcanzar la red de infraestructuras para mantener la eficacia del sistema.

Este enfoque, denominado de demanda, que supone poner el énfasis del análisis en la cuantificación de la solicitud futura de servicio de una red, en la estimación de la cuantía de interrelación que requerirán las actividades urbanas con una localización espacial dada, por la tendencia o por el planeamiento; permitía una aparente objetivización del dimensionado de las infraestructuras y permitía la aplicación de métodos sofisticados de cálculo propios de cada disciplina y con cierta autonomía respecto al planeamiento urbanístico.

Cuando se hace énfasis en la cuantificación de la solicitud futura de servicio de una red y en la estimación de la cuantía de interrelación que requerirán las actividades urbanas que

³ HERCE, M. i MAGRINYÀ, F. La Ingeniería en la Evolución de la Urbanística. Ed. UPC, Barcelona, 2002.

poseen una localización especial determinada, se esta planteando un **“Enfoque de Demanda”**.

Dicho enfoque permite un aparente sustento del dimensionado de las infraestructuras mediante la aplicación de sofisticados métodos de cálculo, proporcionando una cierta autonomía (desarticulación) respecto al planeamiento urbanístico.

Por el solo hecho de tomar como datos de análisis la disposición de las actividades y deducir de dicha disposición la movilidad futura, trae como consecuencia dimensionar las infraestructuras para satisfacer la demanda de relaciones que ha sido calculada. Lo anterior lleva a establecer el siguiente diagrama de entendimiento del dimensionado de infraestructuras.⁴



Un enfoque de demanda supone, pues, poner el énfasis del análisis en la cuantificación de la solicitud futura de servicio de una red, a través de buscar una estimación de la cuantía de interrelación entre las actividades urbanas demandadas en el futuro a partir de una localización espacial dada, llevando a planear la forma y dimensiones de esa red para satisfacer a esa demanda estimada.

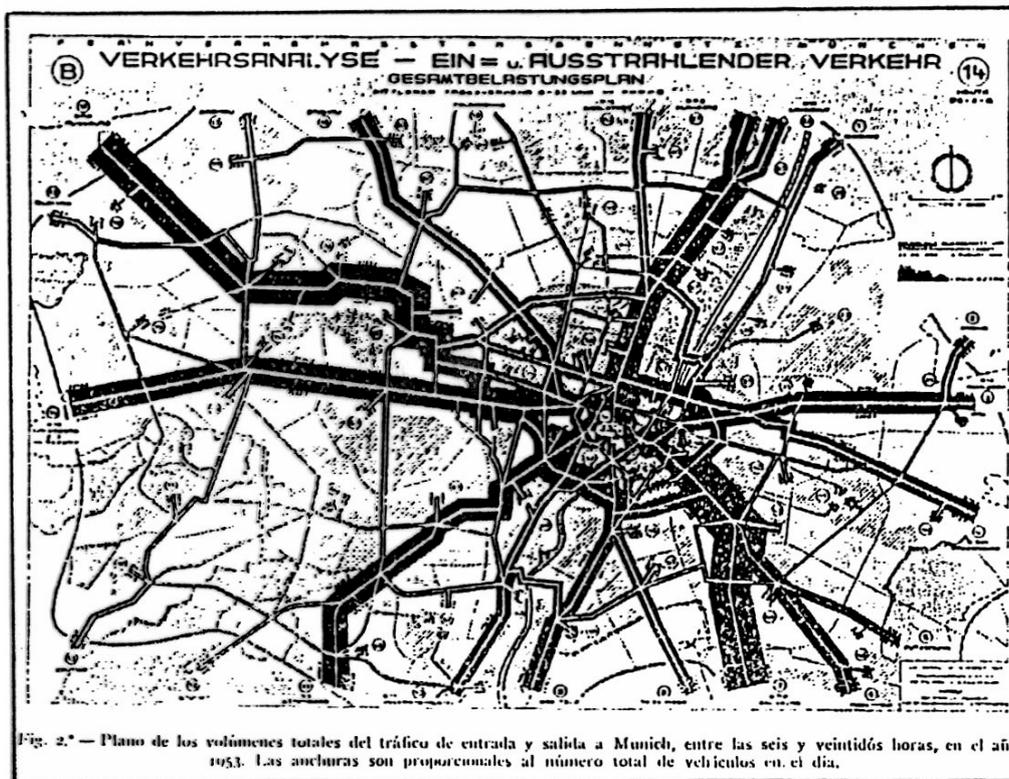
Y, en consecuencia, durante un largo periodo de tiempo se ha puesto énfasis en las *actividades como demandadoras de relaciones*, estableciendo entonces que es la demanda de relaciones la variable que predeterminaba la forma y nivel de servicio que la red de infraestructuras debería alcanzar, para sostener la eficacia del sistema.

Aunque parezca incongruente desde la perspectiva del conocimiento que se tiene del modo en que crece y se organiza la ciudad a partir del crecimiento de sus redes de servicios sobre el territorio, los enfoques de demanda han gozado de un largo predicamento en la planificación urbanística y de las redes de infraestructuras, fundamentalmente de las redes viarias, y continúan siendo base conceptual de muchos de los proyectos viarios actuales.

⁴ HERCE, M. Apuntes de la asignatura Instruments de planejament i projectació. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC, Barcelona, 2004.

La visión especializada impuesta en la concepción de las redes desde los años cuarenta, supuso que cada una de las infraestructuras fuera concebida tan sólo desde sus propios requerimientos de funcionalidad y de demanda de consumo; y así los manuales de dimensionado de redes parten de unas pocas variables (caudal, presión, velocidad, intensidad de viajes o voltaje eléctrico), y sobre ellas plantean nada menos que la organización de las redes, su extensión sobre el territorio, sus dimensiones y capacidad.

Fig. 4.1.1. La cuantificación del tráfico como herramienta de predicción (Munich, 1.953).



Fuente: Proyectos de Variantes y forma urbana (Tesis Doctoral de HERCE, M. UPC, Barcelona, 1.995)

El éxito de los modelos de demanda en su implantación como instrumentos de planeamiento cabe buscarlo en la confluencia de, por lo menos, tres factores:

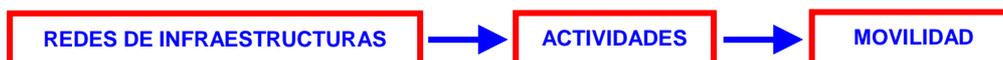
- Correspondencia conceptual con la *sociología funcionalista*, de amplia difusión en el mundo anglosajón desde la “escuela de Chicago” de los años 20, que entiende la organización social como un conjunto de funciones que alcanza su mayor eficacia cuando se acuerdan los requerimientos de sus demandas e interrelaciones.

- Desarrollo técnico de los instrumentos de predicción de la demanda, sobre estudios de comprobación empírica de relaciones cuantitativas entre localización de actividades y cuantía de flujos (modelos cuantitativos), que dieron *rigurosidad a la medición de flujos* (aforos, encuestas de movilidad, análisis de la evolución de la carga en el caso del transporte de mercancías, etc.) y al estudio de sus causas.
- Utilidad de esa concepción e instrumentos en una *fase de desarrollismo territorial* sobre la base de creación de un soporte infraestructural del crecimiento de la ciudad, que sirvió para alimentar un fuerte desarrollo (técnico y financiero) de la construcción y de extensión de la plusvalía urbana mucho más allá de la ciudad.

Los enfoques de demanda se han aplicado a la planificación de todas las infraestructuras, e incluso a un planeamiento urbanístico enfocado solo a la creación de nuevo suelo para satisfacer una demanda estimada a partir del desarrollo de la base económica de una ciudad. Su auge ha coincidido, posiblemente por ello, con la dimensión más caótica de la construcción de la ciudad en su historia; se han entendido las redes de infraestructuras como un fin en si mismo, magnificando sus requerimientos hasta expulsar cualquier otra visión del territorio y de sus recursos.

Como se analiza en esta tesis (Capítulo 8) las más modernas técnicas de planificación de la movilidad adoptan un enfoque conceptual inverso, que podríamos denominar **“Enfoque de Oferta”**. Un enfoque de oferta supone, por el contrario, que la localización de esas actividades, y el modo y cuantía en que se manifiesten en el futuro sus interrelaciones, depende de la forma y organización que se dé a esas redes, e incluso de la gestión (tarifaria, temporal, etc.) que de ellas se haga.⁵

Aunque la descripción de este enfoque alternativo se desarrolla en capítulo posterior, merece la pena, en contraposición al gráfico anterior, plantear uno análogo sobre éste.



Que muestra cómo son las expectativas creadas por las redes las que determinan la localización espacial de las distintas actividades que, a su vez, son las causantes de las demandas de movilidad.

⁵ HERCE, M.; MIRÓ, J. i MAGRINYÀ, M. L'Espai Urbà de la Mobilitat. Ed. UPC, Barcelona 2007.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA Y PASOS QUE SE EMPLEAN EN ESTE MÉTODO.

Aunque parezca incongruente desde la perspectiva del conocimiento que se tiene del modo en que crece y se organiza la ciudad a partir del crecimiento de sus redes de servicios sobre el territorio, los enfoques de demanda han gozado de un largo predicamento en la planificación urbanística y de las redes de infraestructuras, fundamentalmente de las redes viarias, y continúan siendo base conceptual de muchos de los proyectos viarios actuales.

La visión especializada impuesta en la concepción de las redes desde los años cuarenta, supuso que cada una de las infraestructuras fuera concebida tan sólo desde sus propios requerimientos de funcionalidad y de demanda de consumo; y así los manuales de dimensionado de redes parten de unas pocas variables (caudal, presión, velocidad, intensidad de viajes o voltaje eléctrico), y sobre ellas plantean nada menos que la organización de las redes, su extensión sobre el territorio, sus dimensiones y capacidad.

Por su carácter paradigmático, se desarrolla a continuación su versión más conocida, *los modelos de tráfico*, señalando que tanto su enfoque, como sus aplicaciones instrumentales tienen correspondencia en la concepción y dimensionado normalmente efectuado del resto de redes de servicios urbanísticos.

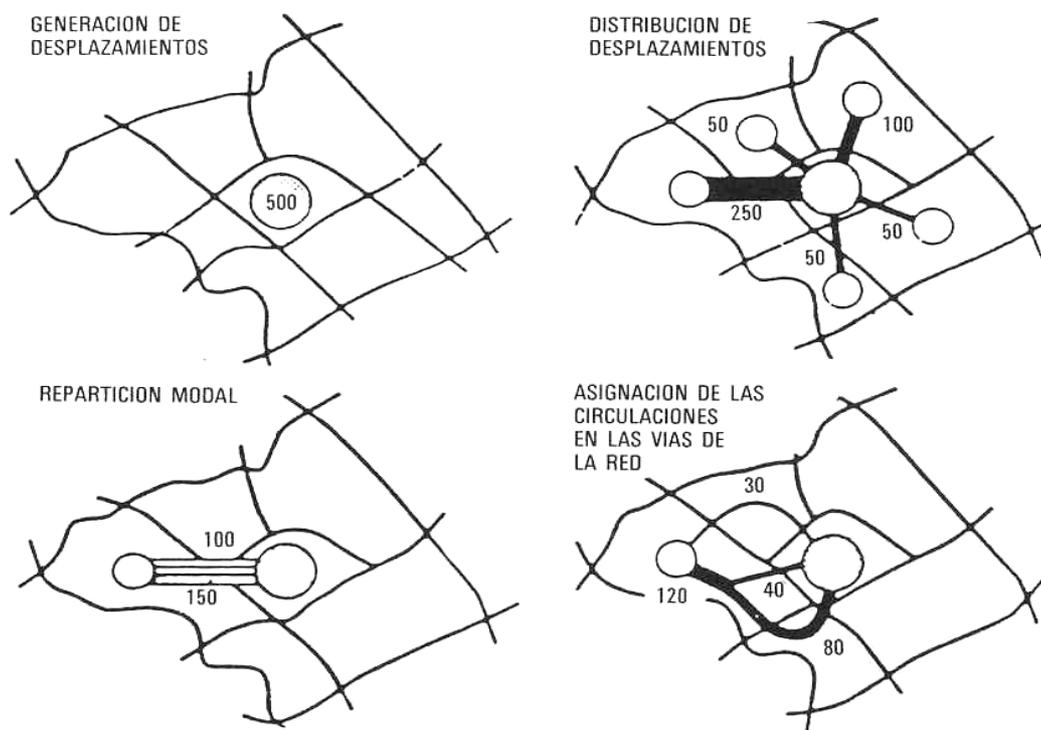
Con el enfoque señalado, los métodos de demanda aplicados a la predicción del transporte de personas, han seguido un esquema conceptual y procesal que se resume en las siguientes fases y contenido:

- Detección espacial de la localización de actividades, mediante la *división del territorio en zonas* en las que se cuantifican las actividades potencialmente generadoras (población por estratos de edad o atractoras (empleo, puestos escolares, comercios, asistencia, etc.) de movilidad.
- Determinación, normalmente por encuesta censal o esporádica, de la *cuantía de viajes efectuados entre zonas* por cada uno de los motivos posibles; incluso con señalamiento de los viajes con origen y destino en el interior de cada zona, aún cuando luego pierdan relevancia en la aplicación a los instrumentos de dimensionado.
- Creación de *modelos matemáticos* que relacionen la cuantía de los viajes interzonales observados con la concentración de factores socio-económicos de atracción o generación de movilidad en cada zona. Modelos de muchos tipos de formulación (gravitatorio,

probabilístico, factorial, etc.) *que se ajustan o calibran* (se encuentran los valores numéricos de sus constantes) para cada motivo de viaje.

- Discriminación de la movilidad interzonal observada por *motivos de viaje* según modos de transporte utilizados, con creación y ajustes de modelos cuantitativos que expliquen ese comportamiento (modelos de “modal split”, normalmente asociados a la renta, la posesión de vehículo, etc.).
- Asignación de esas matrices de viajes detectados a las redes de transporte, a cuyo fin se elaboran grafos simplificados de las redes, se determinan tiempos de recorrido en cada arco, se calculan recorridos de tiempo mínimo entre cada zona, y se ajustan modelos de asignación a la red sobre la base de la medición de la carga real observada en la red (arañas de tráfico realizadas sobre la base de aforos). Es obvio que este ajuste requiere de la transformación de la unidad de conteo temporal del tránsito que se utilice a la unidad viajes/día emanada de las matrices interzonales estimadas.

Fig. 4.2.1. Esquema procesal de los “cuatro pasos” de un modelo de demanda.

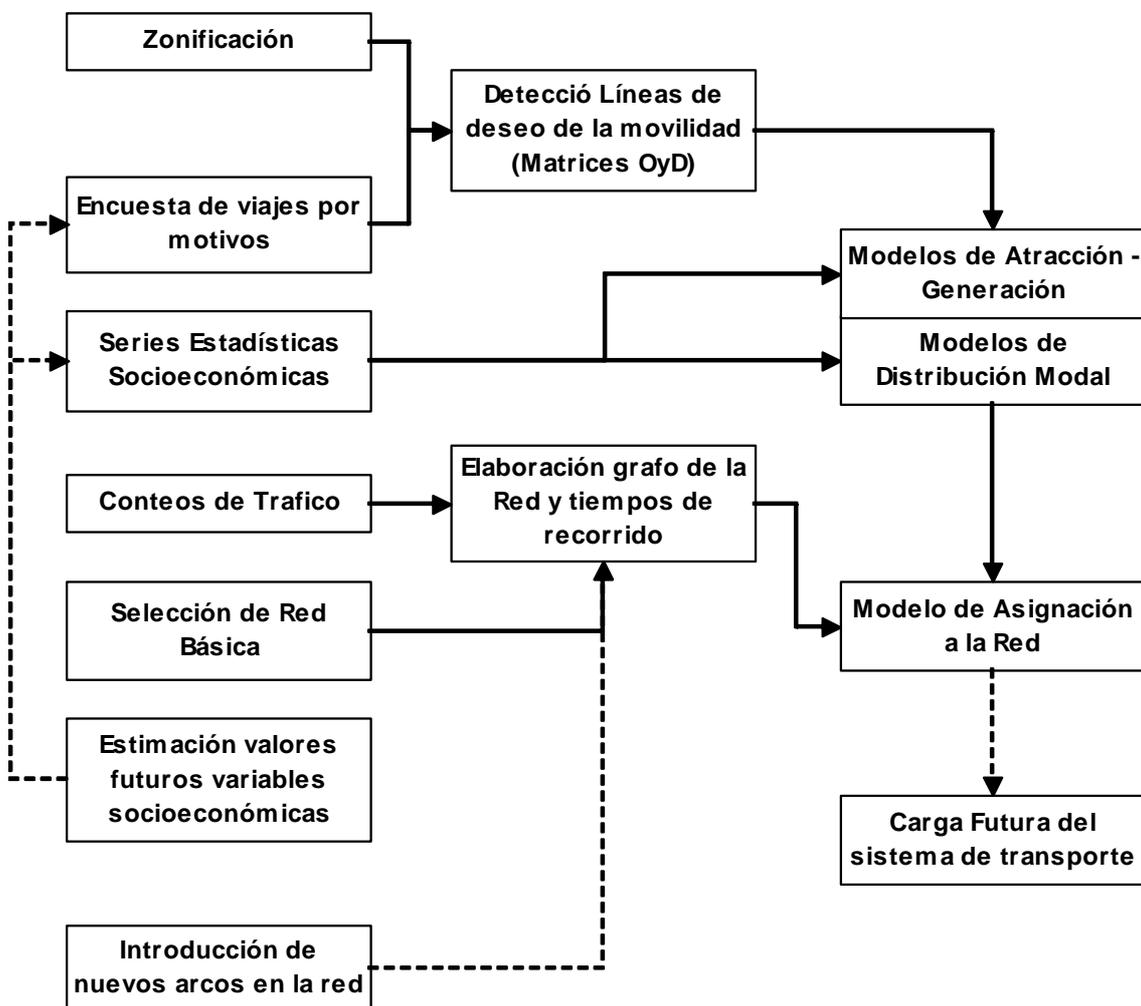


Fuente: GUTIÉRREZ (1.990)⁶

⁶ GUTIÉRREZ, J. La Planificación del Transporte, en Anales de Geografía n° 5 Universidad complutense, Madrid 1990.

Estos cuatro pasos (detección de las matrices de movilidad interzonal, ajuste de modelos que la relacionen con factores de atracción o de generación en cada zona, división modal de la movilidad, y asignación a la red viaria de los viajes entre zonas) pueden tener formulaciones mas o menos sofisticadas y ajustes más o menos rigurosos, y nos servirá de recordatorio su expresión gráfica (altamente conocida) que mostramos en las siguientes Figuras.

Fig. 4.2.2. Esquema del procedimiento de aplicación de un modelo de demanda a la planificación del transporte.



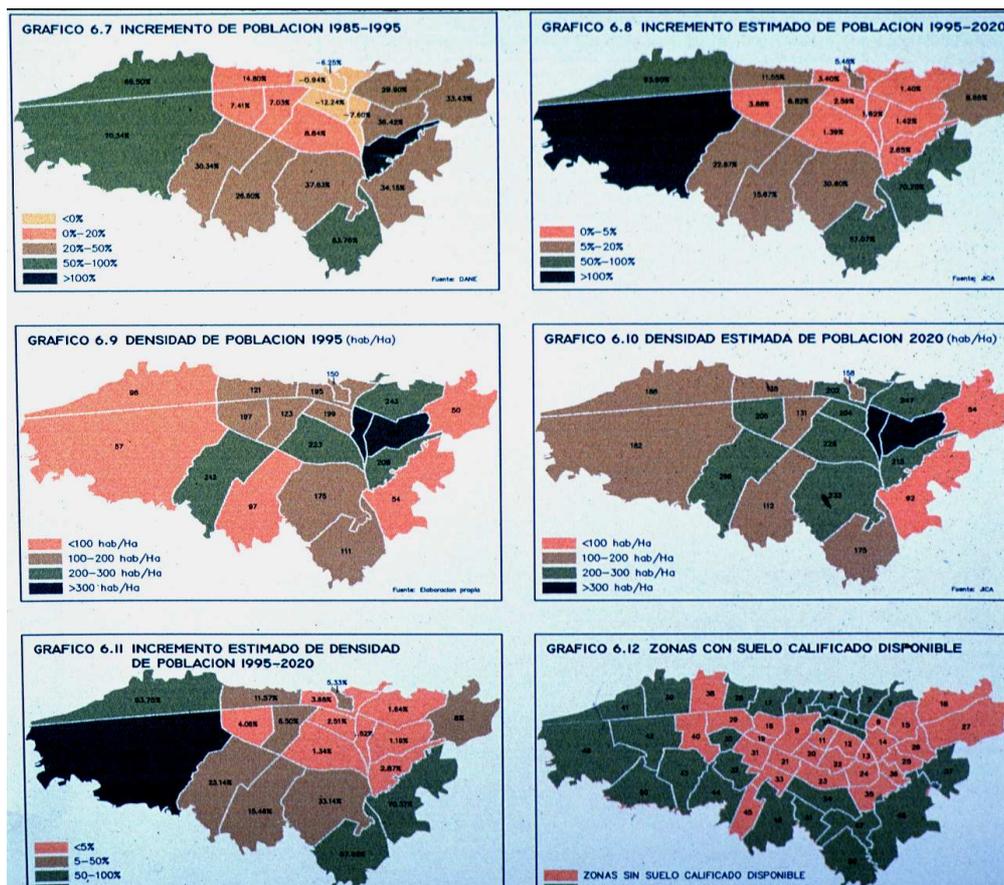
Fuente: HERCE (2.004)⁷

⁷ HERCE, M.: Apuntes de la asignatura Instruments de planejament i projectació. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC, Barcelona, 2004

Las encuestas sobre el comportamiento de la movilidad son un instrumento imprescindible, con independencia del método que se utilice para estimar el futuro sobre la base de esa información estadística. La incorporación de técnicas estadísticas al estudio del transporte urbano ha permitido incorporar todo el rigor del muestreo (tamaño, grupos de interés, etc.) emanado de la disciplina de la sociología. Estas encuestas suelen ser de dos tipos: a la población en general (encuestas domiciliarias, cuya periodicidad se liga a los censos de población en muchos países) y a los usuarios de vehículos (encuestas esporádicas de cordón para el vehículo privado y conteos de billeteaje para el transporte público).⁸

Las encuestas domiciliarias preguntan sobre los viajes que se efectúan al día, sus motivos y su frecuencia, y el modo en que se realizan (diferenciando modos motorizados de modo a pié, y dentro de aquellos el tipo de vehículo y si es de transporte privado o colectivo).

Fig. 4.2.3. Diversas variables explicativas de la movilidad referenciadas por zonas.



Fuente: Dinámicas metropolitanas. MMAMB, Barcelona 1.998.

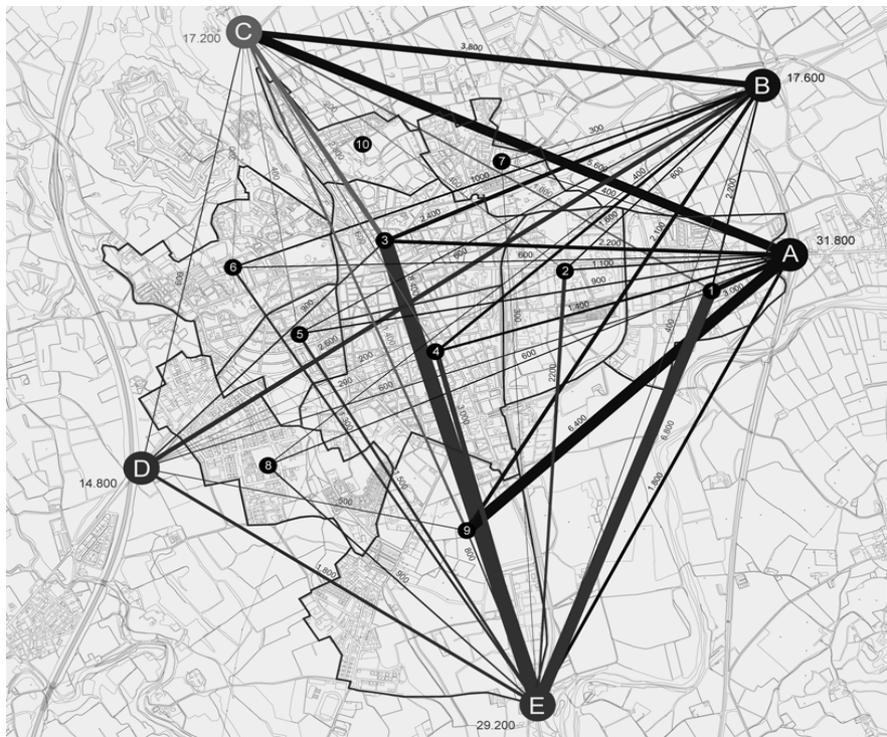
⁸ ROBUSTÉ, F. Apuntes de Ingeniería del Transporte. Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC, 1994.

Esta observación de la movilidad se referencia a zonas; es decir, se divide la ciudad en zonas y se refieren a ellas las actividades explicativas de la movilidad a cada una de ellas. Por lo tanto, la propia lógica del modelo obliga a convertir un universo de observación continuo sobre el territorio en un universo discreto, concentrando toda la información en un punto (un nudo del grafo de asignación después) que representa la zona, con las consecuencias que luego se analizan.

La división en zonas es una decisión importante, por cuanto ha de corresponderse con divisiones administrativas de la ciudad si se quieren aprovechar como fuentes estadísticas, cosa que deviene imprescindible si se quieren analizar series históricas de evolución de las variables.

Las observaciones de la movilidad, por motivos y por modos, se introducen en matrices que tienen tantas filas y columnas como zonas utilizadas. Los datos de viajes de la diagonal principal de la matriz corresponden a los viajes que no salen de la zona (Viajes intrazonales). Estas matrices se denominan “matrices de origen-destino”

Fig. 4.2.4. Expresión gráfica de las matrices O-D como líneas de deseo.



Fuente: Pla de Mobilitat de Figueras. HERCE, M. i ESPELT, P., 2.006

Sobre la base de esta información estadística se realiza el segundo paso, consistente en encontrar algún tipo de fórmula que ajuste bien las observaciones de la movilidad con las demás variables observadas que referencian las distintas actividades causantes de aquellas (lugares de trabajo, de estudios, de compras, de ocio, de residencia, etc.)

Estas formulaciones matemáticas (modelos de generación y atracción) pueden ser de muy diversos tipos. Desde las primitivas funciones gravitatorias ($V_{ij} = a P_i b E_j / d_{ij}^c$), hasta formulaciones de tipo probabilístico, exponencial, factorial, etc.

La más frecuente de las formulaciones utilizadas hoy en día es la formulación factorial calculada a base de regresiones lineales múltiples entre la variable viaje por un determinado motivo y diversas variables causales (población, trabajo, escuela, etc.).

Finalmente suelen adoptar fórmulas diferentes para viajes generados y para viajes atraídos y diferenciar los viajes denominados obligados (recurrentes cada día) de los no obligados (o de producción esporádica a lo largo del tiempo), del tipo

$$V_{i \text{ trab. atraído}} = a E_i + b X_i + c EX + d$$

Cuando las fórmulas tan sólo expresan viajes atraídos o generados por cada zona, hay que generar luego otra fórmula (gravitatoria, exponencial o probabilística) que permita determinar el modo en que el juego de aquella atracción y generación acaba plasmándose en viajes interzonales.

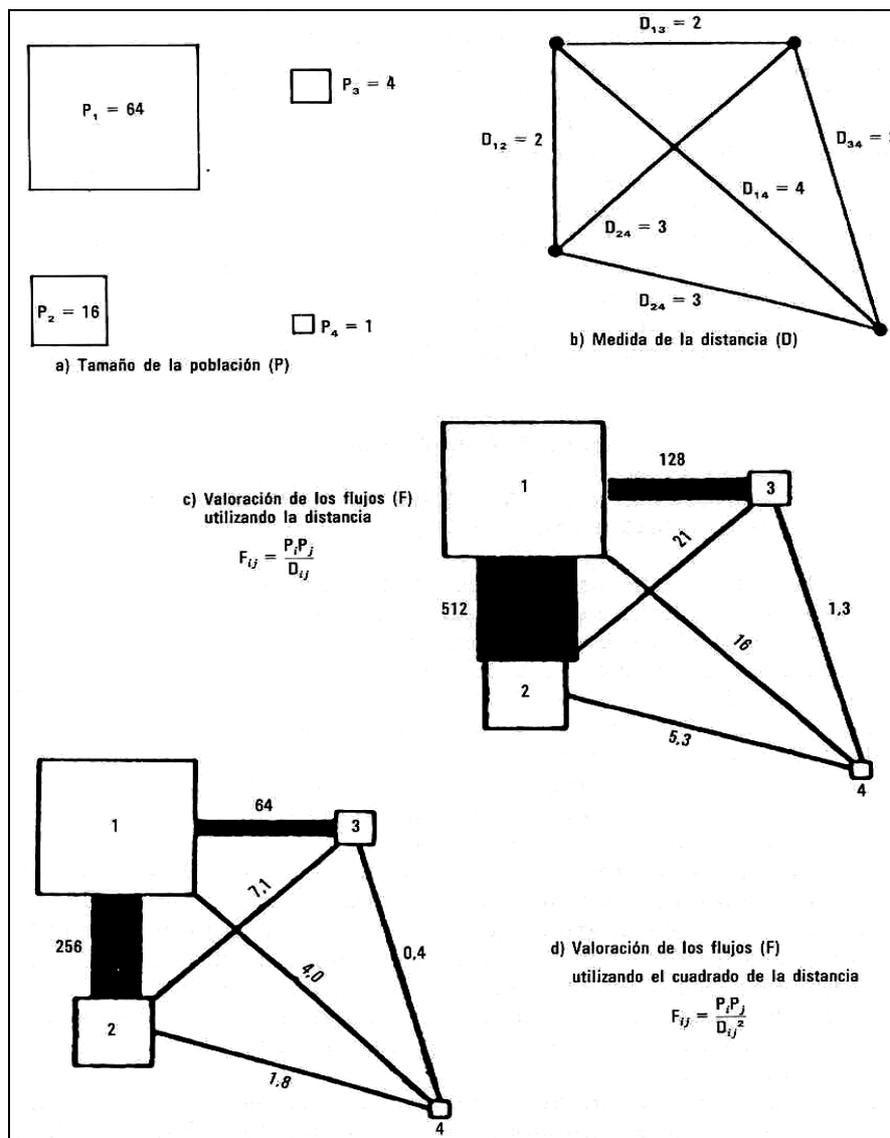
El hecho de ajustar la fórmula, es decir encontrar los valores de sus constantes (a, b, c y d en el ejemplo anterior) se llama *calibrar el modelo*, y la bondad de esa calibración se mide por parámetros estadísticos como la desviación media y la varianza (σ^2).

Estas formulaciones han de servir para estimar la cuantía de la demanda de viajes por cada motivo en el futuro (en el horizonte del plan) a partir de una estimación de los valores que las variables independientes tomaran en ese horizonte.

El tercer paso es la distribución de esos viajes por modos, o "modal split"; para ello se utilizan también formulaciones que miden la elasticidad al tiempo de viaje, o a la tarifa, etc. El más utilizado es el que pretende medir la utilidad percibida por el usuario, que mesurable (en tiempo, coste, etc.) y un componente aleatorio; sobre ese segundo componente hay que

establecer funciones de probabilidad, que si adoptan distribuciones tipo Gumbel dan pié al más conocido de los modelos que es el denominado *lógic*, en el que la probabilidad de usar un modo de transporte es el cociente de un exponencial de la velocidad en él, partido por la sumatoria de exponenciales en los diferentes modos. No obstante, también se utilizan modelos que discriminan por motivos y modos, usando formulaciones factoriales ajustadas por regresión múltiple.

Fig. 4.2.5. Ensayos de asignación con diferentes opciones de variables

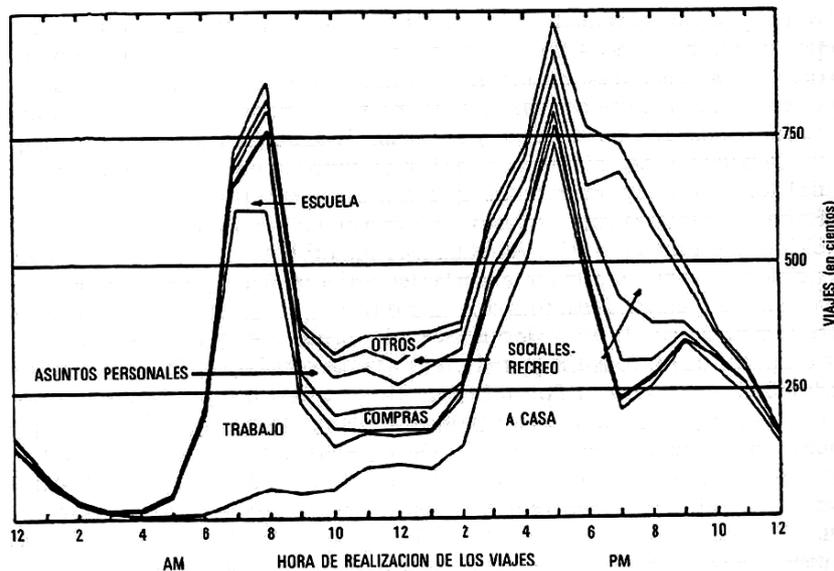


Fuente: HAGGET, (1.976)⁹

⁹ HAGGET, P: Análisis locacional en geografía. Ed. G. Gili, Barcelona, 1976.

Hay que destacar, que en los ejercicios de planificación de redes viarias se busca prácticamente cuantificar la demanda en punta, porque será para ella para la que se dimensione la red final. Por ello, se acaban aislando motivos y modos de viaje, para concluir ajustando el viaje cotidiano al trabajo y a los estudios, que aúnan el doble carácter de ser predecible mejor (por su repetitividad) y de causar las puntas de congestión a ciertas horas.

Fig. 4.2.6. Distribución de la movilidad a lo largo del día.



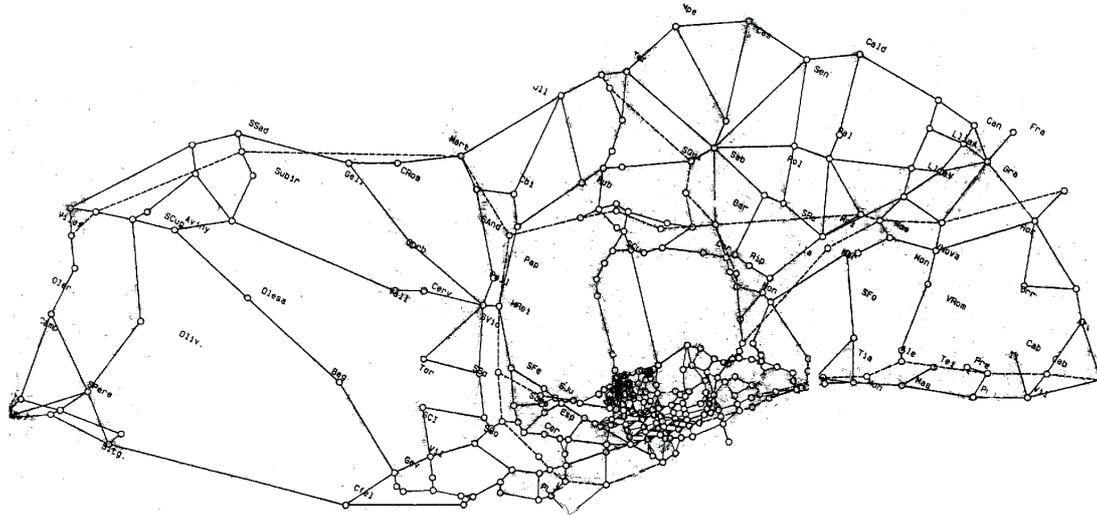
Fuente: DICKEY, 1.977 (En VALDÉS, A.)¹⁰

Con estos datos se aborda el cuarto paso metodológico, la llamada *asignación a la red*. Partiendo de las matrices por motivos y modos ajustadas ahora a viajes en hora punta (ajuste deducido de las encuestas y aforos o por aplicación de porcentajes a las matrices diarias) se trata de ver como se expresan sobre el espacio, sobre que recorridos viarios en el caso de transporte individual o sobre que líneas de transporte colectivo.

Para ello, se ha construido un grafo representativo de la red que se considere a los efectos de la planificación: un grafo, que es un artilugio de cálculo informático, esta constituido por los nudos donde se cruzan o unen los arcos (tramos viarios) y por los centroides representativos de cada zona donde se acumulan las variables observadas (unidas a veces al grafo por unos falsos arcos denominados radios o conectores).

¹⁰ DICKEY, 1977, (en A. Valdés): Ingeniería de tráfico. Ed. Dossat, Madrid, 1971

Fig. 4.2.7. Grafo del AMB de Barcelona.



Fuente: Cambios de topología de la red viaria y localización de actividades. Herce Asociados-Ayuntamiento de Barcelona, 1.995.

Para asignar los viajes observados y ajustados en las matrices a la red se suele utilizar un algoritmo simple de determinación del camino mínimo (en tiempo o en coste), utilizándose formulaciones de varias posibles lógicas.

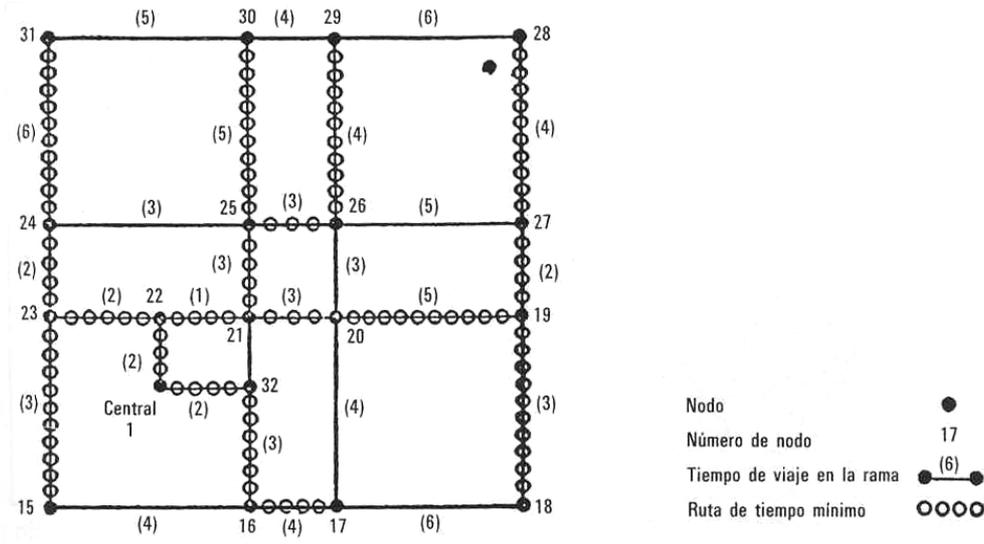
La asignación puede ser por “todo o nada” con el solo límite de la capacidad de la vía (que es la única que se usa para el transporte colectivo), por asignación incremental disminuyendo la atractividad de la vía según va alcanzando su capacidad, o por formulaciones de tipo probabilístico buscando el equilibrio del sistema.

Los algoritmos de asignación más conocidos, como el de Moore, determinan un árbol de recorridos, partiendo del arco anterior con camino mínimo, cosa que puede hacerse en tiempo (lo más habitual en la asignación de transporte privado, o en coste, puro o combinado con tiempo, como suele hacerse en transporte privado: al resultado global se suele asignar una validación ajustada según el principio de Wardrop, que aúna el hecho de maximizar la utilidad del usuario con la del sistema.

Ajustar las funciones de asignación requiere del conocimiento de la carga de la red a lo largo del día, y para ello se utilizan los aforos permanentes o esporádicos, que son la base del conocimiento de la expresión espacial de la movilidad en vehículo rodado.

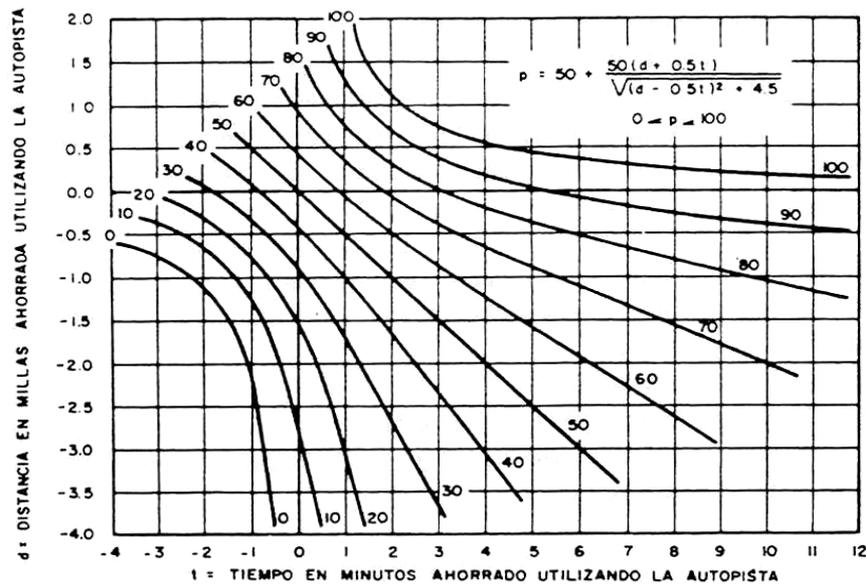
La representación gráfica de esos aforos, con anchos diferentes en función de la intensidad observada en cada arco, se denomina “araña de tráfico”

Fig. 4.2.8. Determinación de rutas de camino mínimo.



Fuente: LANE, R. i POWELL, T. (1.975).¹¹

Fig. 4.2.9. Curvas para asignación según tiempos de recorrido en rutas alternativas.



Fuente: KRAMER, (1.977).¹²

¹¹ LANE, R. i POWELL, T.: Planificación analítica del transporte. Ed. IEAL, Madrid, 1975.

¹² KRAMER, C. Carreteras: tráfico y trazado. Ed. Colegio Ing. Caminos, Madrid, 1.977

Fig. 4.2.10. Araña de tráfico del núcleo central de Madrid.



Fuente: VALDÉS, (1.971)¹³

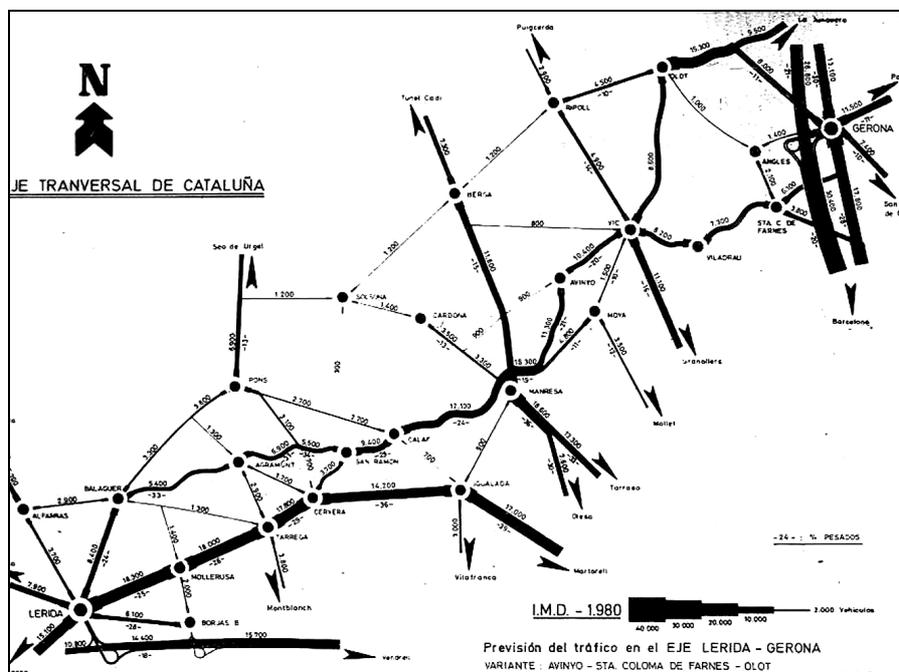
Una vez ajustados los parámetros de las funciones de asignación, mediante correlación y cotejo con los aforos observados en la realidad, puede decirse que el aparato instrumental está completamente preparado para su aplicación a escenarios de futuro.

¹³ VALDÉS, A. Ingeniería de tráfico. Ed. Dossat, Madrid, 1971

El conocimiento de la forma que adopta la movilidad, incluso de su evolución a lo largo del tiempo, y los instrumentos desarrollados para ello constituyen indudables avances instrumentales; incluso, aunque menos rigurosa, la modelización matemática de ese comportamiento tiene un valor explicativo no despreciable y de una cierta utilidad.

El problema es que sobre la base de esos instrumentos, se plantean a continuación las propuestas de planificación, *extrapolando los modelos ajustados sobre la base de la observación a situaciones futuras* (incluso, en los casos de mayor sofisticación alterando el peso de sus variables sobre tendencias observadas de evolución de comportamientos).

Fig. 4.2.11. Estimación de la carga futura de un eje viario por métodos de demanda.



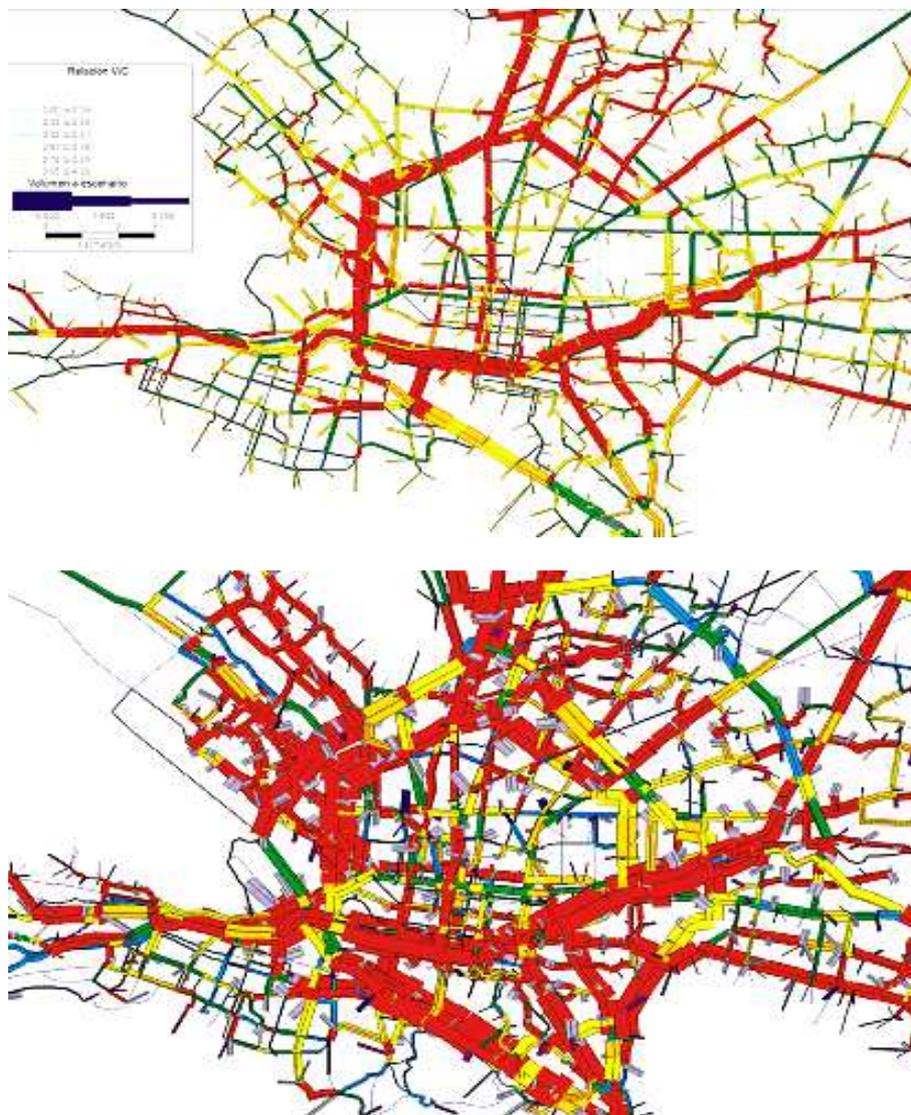
Fuente: Estudios para el eje transversal de Cataluña. Ayuntamiento de Figueres 1.986.

Para la fabricación de los escenarios de futuro, se estima, en primer lugar, la futura distribución de las actividades en la ciudad, se determinan sus matrices futuras de demanda de movilidad en aplicación de los modelos de generación-atracción y de distribución modal calibrados, se plantean diversas políticas de alteración de la redes de transporte (normalmente solo la viaria), y se asigna ese tráfico generado por la demanda a diversos supuestos de red hasta lograr un funcionamiento satisfactorio del tráfico en el futuro.¹⁴

¹⁴ HERCE, M: Curso de gestión de la movilidad. Escola Sert, Barcelona 2006.

Toda la metodología está, pues, enfocada a una estimación de futuros que reproduce la lógica del presente, y además es una metodología que, como se ha visto, esta fundamentalmente pensada con una filosofía de que el uso del coche es la opción prioritaria, de manera que el uso del transporte colectivo solo se da por exclusión del otro sistema de transporte. Finalmente, se trata de estimar el uso futuro del coche para la movilidad recurrente (obligada) porque esta produce las puntas de tráfico. El resto de motivos y modos también han quedado reflejados en las matrices y modelos, pero siempre como subproducto, a veces sin utilización ninguna (como el viaje a pie).

Fig. 4.2.12. Carga actual y proyección a quince años del tránsito en Monterrey (Méjico).



Fuente: Plan de Transportes de Monterrey (Méjico). Alcaldía, 2.004

No es de extrañar que cualquier aplicación de esos modelos a plazos no excesivamente largos, concluya siempre con gráficos de carga de la red futura que constituyen escenarios caóticos y casi imposibles de gestionar, que requieren de fuertes intervenciones en el viario urbano.

Existen en la actualidad, existen en el mercado un cierto número de Software que permiten aplicar de corrido esta metodología de los cuatro pasos. De entre ellos destacan los denominados micro TRIPS¹⁵, MINUITS, VIPS, TransCad¹⁶, EMME/2¹⁷, etc.

Más recientemente han aparecido otros modelos que permiten utilizar metodologías análogas pero añaden un instrumental muy útil de simulación del funcionamiento real en la red, sobre la base de aplicación de lógicas de funcionamiento de flujos. De entre ellos destacan PROLYN¹⁸, SCATS¹⁹, TRAFCOD²⁰, SPPORT²¹, SCOOT²², OPAC²³ y sobre todo el AISBUN diseñado en la Universidad Politécnica de Cataluña.

4.3. CRITICA A LOS ASPECTOS METODOLÓGICOS.

La pretendida rigurosidad formal de la modelización se enfrenta a una serie de dificultades, que normalmente se eluden, pero que conviene conocer para poder validar los resultados del análisis. De entre ellas, cabe destacar algunas, que tienen *especial importancia a la hora de proyectar los fenómenos observados como predicción de futuro*, son las siguientes.

1. La división zonal del territorio suele responder a divisiones administrativas, y no puede ser de otro modo si se quiere comprobar la validez de los datos y manejar series temporales que muestren sus tendencias de evolución. Ello conlleva una desigual división de la ciudad, con

¹⁵ FERGUSON, G. i ALLEN, J. TRIPS: An Integrated Intelligent Problem-Solving Assistant. Department of Computer Science. University of Rochester. 1.998.

¹⁶ Software desarrollado por Caliper Corporation. <http://www.caliper.com/tcovu.htm> 18/06/07

¹⁷ Software desarrollado por INRO Corporation. <http://www.inro.ca/en/index.php> 18/06/07

¹⁸ HENRY, J. i FARGES, J. P.t. priority and prodyn. In *Proceeding of the first World Congress On Applications of Transport Telematics and Intelligent Vehicle Highway Systems*, pages 3086–3093, Paris-France, 1994. Software desarrollado por ONERA-CERT (DERA). Método para control de tráfico Urbano en tiempo real. <http://www.cert.fr/dcsd/cd/MEMBRES/farges/PROLYN.html> 15/06/07

¹⁹ CHEN, W.; JARJEES, G. i DRANE, C. A new approach for bus priority at signalised intersecciones. In *ARRB Transport Research LTD Conference, 19th*, Sydney-Australia, 1998. Citado por BHOURLI, N. i LOTITO, P. Advanced OR and AI Methods in Transportation. *An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport*. <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID55.pdf> 15/06/07

²⁰ FURTH, P. i MULLER, T. TRAFCOD: A method for stream based control of actuated traffic signals. In *78th Annual meeting of the Transportation Research Board*, Washington, USA, 1999. Citado por BHOURLI, N. i LOTITO, P. Advanced OR and AI Methods in Transportation. *An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport*. <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID55.pdf> 15/06/07

²¹ HAN, B. i YAGAR, S. Real-time control of traffic with bus ans streetcar interactions. In *Proceeding of the 6th IEE International Conference on road traffic monitoring and control*, pages 108–112, London, UK, 1992.

²² HUNT, P.; ROBERSTON, D.; BRETHERTON, R. i ROYLE, M.C. The scoot on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering & Control*, 23:190–199, 1982.

²³ GARTNER, N.H. (1.982): Demand-responsive decentralised urban traffic control. US Department of Transportation DOT/RSPA/DPB -50/81/24. Citado por FRIEDRICH, B.

Adaptive signal control: An overview. Institute of Transport Engineering and Planning University of Hannover. http://www.iasi.cnr.it/ewgt/13conference/102_friedrich.pdf 13/07/07

áreas centrales de pequeño tamaño y sobre las que se tienen series históricas de datos, y áreas periféricas de gran tamaño y menor cuantía de datos. Actualmente los Sistemas de Información Geográfica (GIS) ayudan a resolver en parte dicho inconveniente.

2. De ello se infiere una doble consecuencia: en esas áreas periféricas (por su tamaño) los *viajes intrazonales tienen mucha mayor importancia* que las que le suelen asignar los modelos; y *las variaciones futuras de las actividades en ellas están mucho más sujetas a incertidumbre* que en las áreas más consolidadas, y sin embargo, la mayoría de vías que se testan con el modelo transcurren por su territorio. La opción es delicada, si las estimaciones de crecimiento a futuro se basan en las previsiones de los planes urbanísticos, las que crecerán serán esas zonas, y si las previsiones se basan en las tendencias históricas crecerán las áreas centrales consolidadas.

3. Las matrices resultantes de las observaciones de viajes son por su esencia desiguales en sus datos zonales y asimétricas en cuanto a viales interzonales; es por ello que requieren de posteriores ajustes, que suelen resolverse al alza. La mera observación de correlaciones básicas entre distintas variables (como viajes/persona/día, motorización, renta, tamaño, etc.) efectuada entre los datos de los estudios de tráfico de doce grandes ciudades occidentales muestra una disparidad de resultados tal que pone en tela de juicio muchos de los datos observados²⁴.

Uno de los aspectos que más sorprende cuando se efectúan esas correlaciones, es la disparidad de datos ya sobre la primera de las variables estimadas: el número total de viajes/día, que debiera ser proporcional a la población, total o por grupos según motivos, con tan solo ciertas diferencias emanadas del nivel de renta.

En España, el número de desplazamientos que se producen en una ciudad, por lo general, fluctúa entre 2,70 y 3,00 viajes por persona por día²⁵, valores que varían según la ocupación de la población y su división por estratos sociales, los cuales son factores que sumados al nivel de desarrollo económico de la población influyen directamente la movilidad que se presenta en las ciudades. De esa cifra un 65% de promedio suelen ser los viajes denominados obligados.

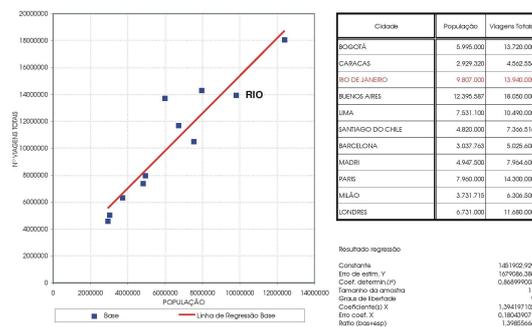
²⁴ HERCE, M.; NASAR, C. i LEIRA, E. Proyecto de la avenida Longitudinal de Occidente. IDU, Bogotá, 1996

²⁵ HERCE, M. Curso de movilidad. Escola Sert-Diputació de Barcelona. 2006

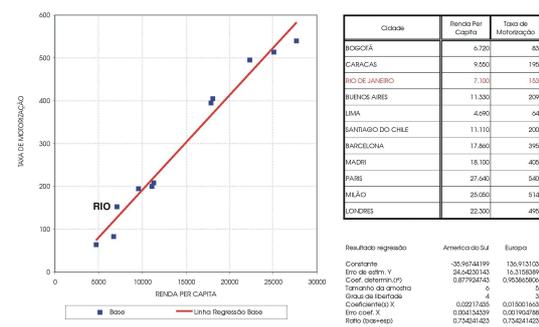
Pues bien, en la Figura 4.3.1. se observa la disparidad de esos resultados en ciudades cuyas lógica económica y social es parecida, y solo se logra ajustar una regresión de varianza aceptable cuando se diferencian las ciudades europeas (1,8 – 2,0 viajes obligados/día) de las sudamericanas (1,5 - 1,6 viajes obligados/día).

Fig. 4.3.1. Correlaciones entre variables básicas de viajes deducidas de diversos planes de Transporte

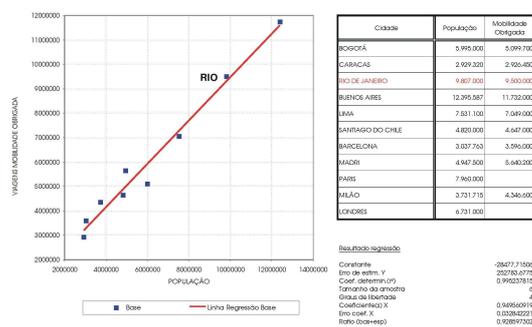
REGRESSÃO POPULAÇÃO TOTAL por Nº VIAGENS TOTAIS



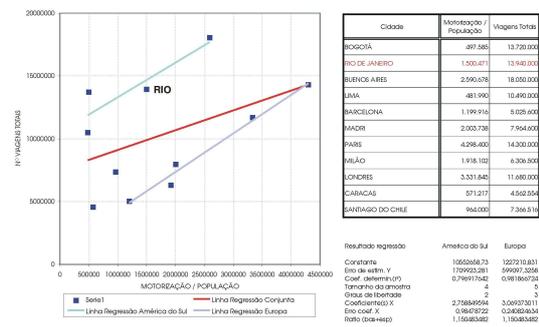
REGRESSÃO RENDA PER CAPITA por TAXA DE MOTORIZAÇÃO



REGRESSÃO POPULAÇÃO por VIAGENS MOBILIDADE OBRIGADA



REGRESSÃO MOTORIZAÇÃO TOTAL por Nº VIAGENS



Fuente: Estudio de tráfico da Avda Brasil de Rio de Janeiro (HERCE - EGI, 1.998)

4. La distribución modal parte de una base sesgada; al ser difícilmente es entendible por el encuestado la diferencia entre modos de viaje principal y complementarios, se suele recurrir a no tener en cuenta el viaje a pié, cuando su cuantía es de gran expresividad en caracterización de la expresión espacial de la movilidad en una ciudad.

Ese importante sesgo de partida, incluso el olvido de la intermodalidad de muchos viajes, va a pesar tanto que finalmente solo se utilizan matrices de viajes obligados interzonales y en coche o autobús (lo que representa menos del 50 % de la movilidad total producida al día en cualquier ciudad).

Respecto a la distribución modal, es necesario hacer también una distinción del comportamiento de la movilidad obligada (Desplazamientos al trabajo o estudio) y del tamaño de la población para cada caso en particular.

Actualmente, en las grandes ciudades europeas, aproximadamente 1/3 de la movilidad obligada diaria se realiza en modo a pie, las otras 2/3 partes se reparten entre el vehículo privado y el transporte público colectivo, presentándose un predominio de este último en ciudades que tienen desarrollada una importante red de metro-ferrocarril; así mismo, hay predominio del transporte privado en ciudades de tamaño medio que poseen un transporte colectivo limitado a sus redes de autobuses, teniéndose que los viajes de movilidad obligada de carácter intermunicipal se realizan primordialmente en vehículo privado (>80%), mientras que los viajes intramunicipales se realizan primordialmente a pie (aprox. 50%)²⁶.

5. Ello nos lleva a un punto clave del problema, sobre el que se volverá en los capítulos 8 y 9 de esta tesis: no puede tomarse (ni debe) la distribución modal como un dato; la distribución entre modos de transporte es una política fundamental de organización de la movilidad en una ciudad, y a ella se destinan gran número de medidas de disuasión del tráfico, de incentivos para el transporte colectivo, etc.

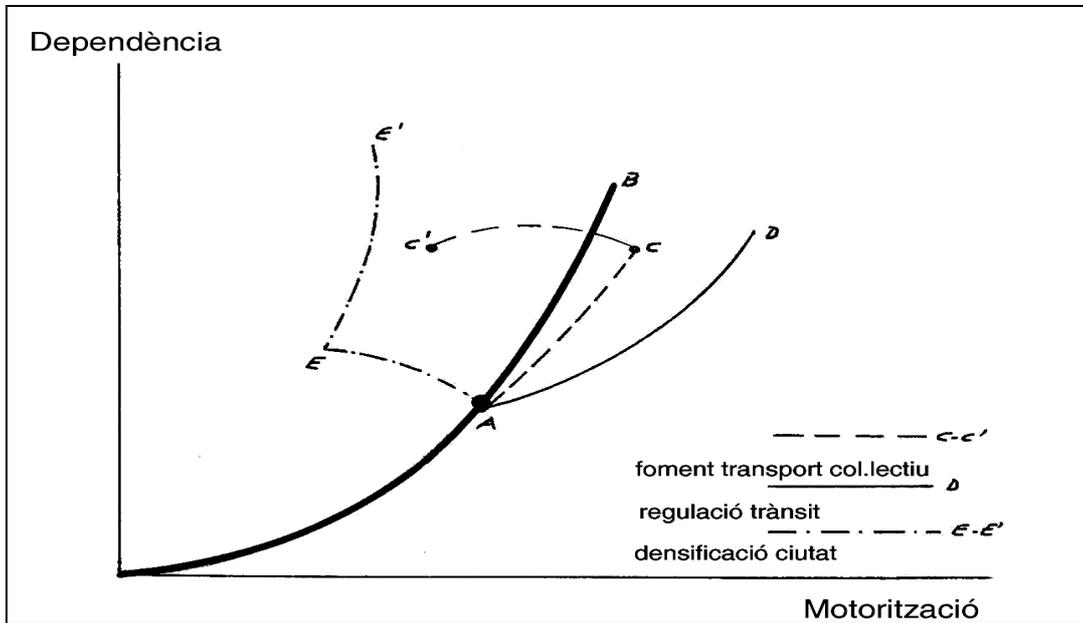
En última instancia, en las grandes ciudades occidentales ha dejado de ser cierto que el uso del automóvil en los viajes cotidianos está ligado a su posesión o al nivel de renta.

Hace algún tiempo que el uso del vehículo particular ha dejado de depender de la tasa de motorización de las ciudades y ha dejado de ser símbolo de riqueza, dado que casi todas las familias poseen vehículo privado, siendo más dependiente de éste la población menos favorecida que por lo general esta ubicada en la periferia donde no hay un adecuado servicio de TPCU.

Actualmente, en las ciudades que poseen un buen sistema de TPCU, la movilidad obligada es absorbida por éste, presentándose un mayor uso del vehículo privado en los fines de semana para viajes de larga distancia, cosa, por tanto, que altera radicalmente los supuestos de la metodología analizada.

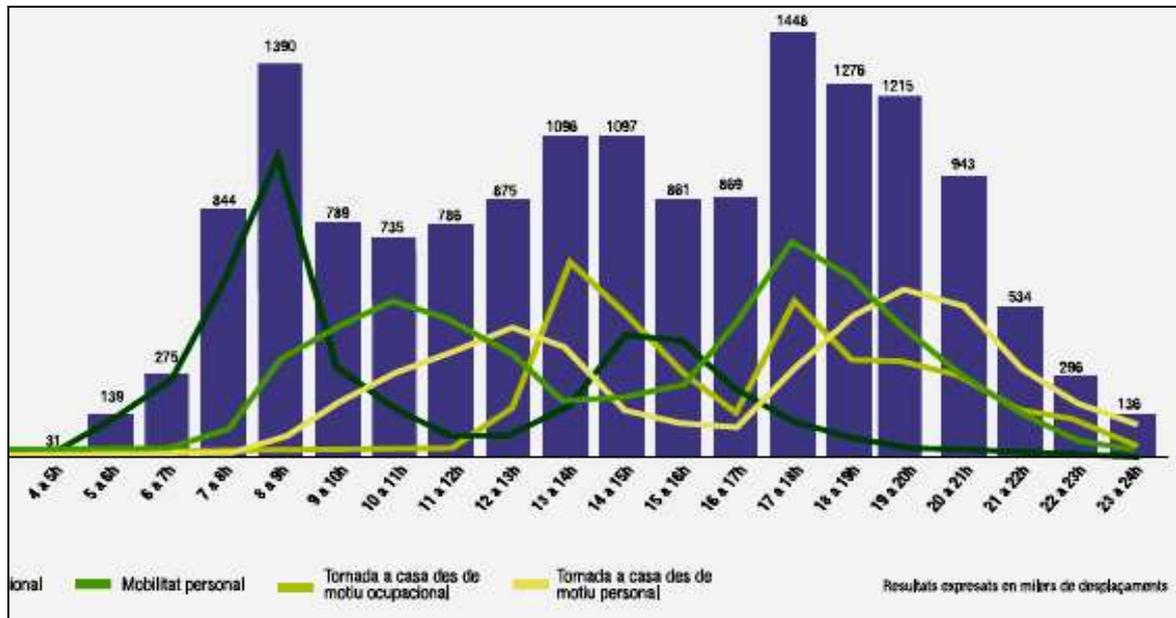
²⁶ HERCE, M. Marco de Referencia Funcional en la Planificación de la Movilidad Local. Escola SERT-Diputació de Barcelona. Xarxa de Municipis. 2006.

Fig. 4.3.2. Políticas combinadas para la reducción de la dependencia de la movilidad urbana respecto del vehículo privado.



Fuente: G. Dupuy: L'espace de l'automobil. Ed. Antropos, Paris, 1.998.

Fig. 4.3.3. Puntas actuales de distribución de tráfico en Barcelona.

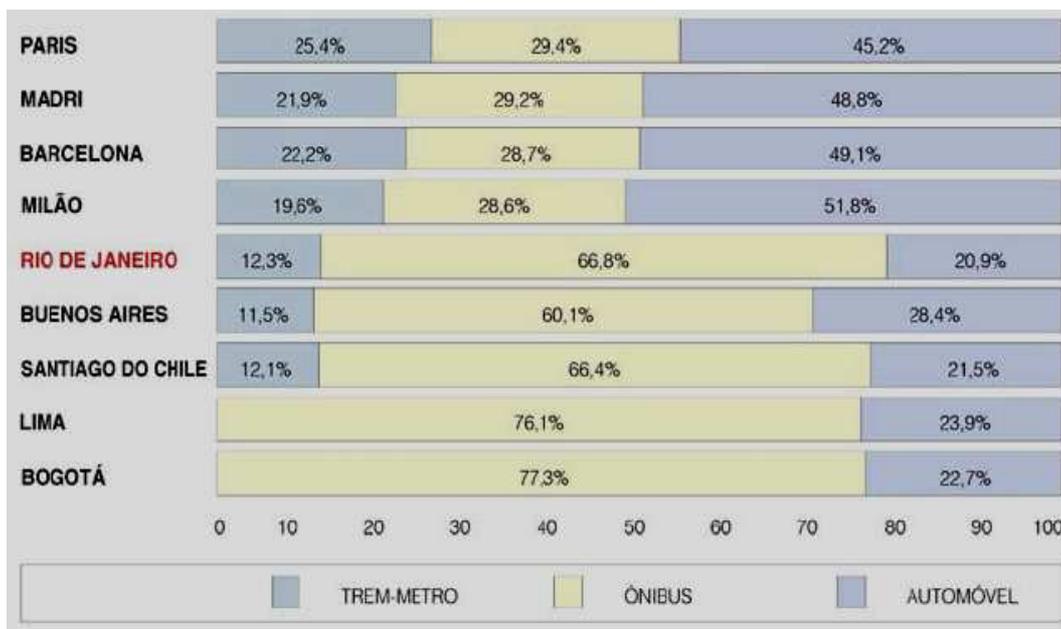


Fuente: Encuesta de mobilitat 2.006, AMB, GENCAT

Por otro lado, es de destacar la importancia de las redes de TPCU en las ciudades sudamericanas (siendo la principal causa de congestión urbana) además de la del los sistemas de transporte colectivo de infraestructura fija en las ciudades europeas, muestra de lo errado de poner el acento en el automóvil.

6. Esta última observación es aplicable también a la preocupación por centrarse en el viaje al trabajo como motivadores de puntas, cuando comienza a no ser estrictamente verdad en muchas metrópolis. En ellas ha dejado de haber puntas muy concentradas, extendiéndose a lo largo horas por la multiplicación de viajes de negocios, gestiones y reparto propias de una nueva organización atomizada del trabajo.

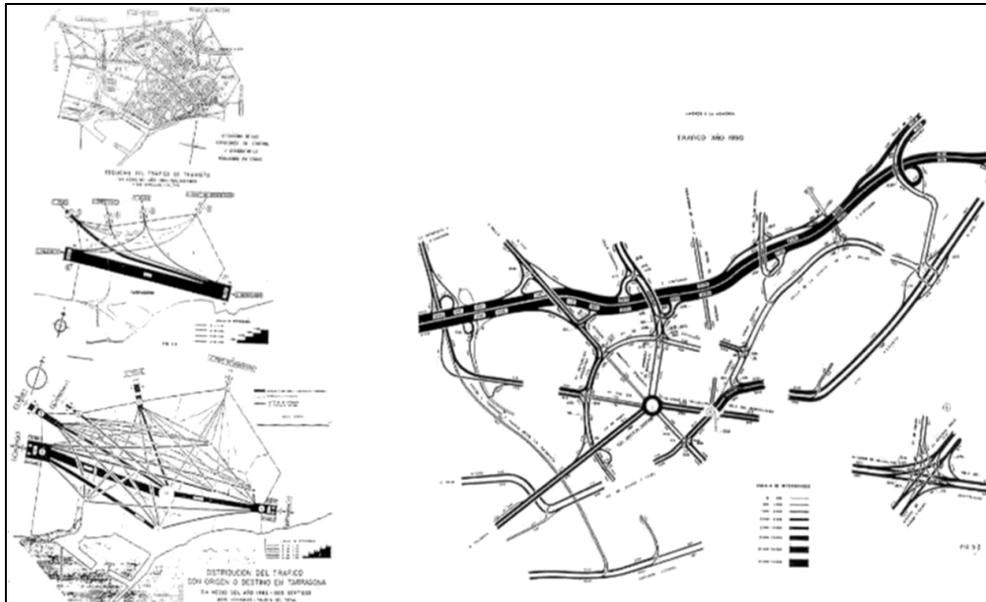
Fig. 4.3.4. Distribución modal de los viajes motorizados en grandes ciudades



Fuente: Estudio de tráfico da Avda Brasil de Rio de Janeiro (Herce-EGi, 1998)

7. En la asignación de los viajes entre zonas a la red viaria, se está ante una de las mayores dificultades metodológicas; la asignación se hace sobre tiempos de recorrido (a veces matizados por la capacidad del tramo), y para estimar estos se ha de recurrir a fijar la velocidad de recorrido en cada tramo, de difícil determinación con criterio uniforme para la red observada (la existente) y la futura (la planeada). La alteración de la asignación del tráfico con pequeñas variaciones de la velocidad, entraña el riesgo de la manipulación de resultados.

Fig. 4.3.5. Estimación de la carga futura de la variante de Tarragona de 1.975, con casi vaciado del resto de la trama urbana.



Fuente: Proyecto de variante de la N-340 (Ministerio de Obras Públicas), 1.975

Fig. 4.3.6. Carga actual de la red viaria de Tarragona, con equilibrio de rutas.



Fuente: Plan de Movilidad del sector Terres Cavades de Tarragona. EGI s.l, 1.999

De hecho, todas las asignaciones de carga realizadas en estudios de tráfico concluyen con casi un vaciado de la red a favor de la vía analizada, y sin las limitaciones de capacidad porque, finalmente, las condiciones físicas de ancho de vía se suelen establecer en función de esa carga. Si se tiene en cuenta la lógica de asignación plasmada en el apartado anterior, se puede entender como frente a velocidades en la red de alrededor de 25 km/hora, toda la red se polarizada hacia un nuevo recorrido en el momento que a éste se le asignan velocidades del orden del doble o del triple de esa cifra.

Es curioso comprobar como todas las estimaciones de carga futura en vías nuevas dan cifras exageradas, colaborando a aumentar su necesidad de construcción. Los defensores de los modelos de demanda aducen que, a pesar de ello, tiempo después de su construcción su intensidad de uso supera esas cifras, pero ello no es más que una consecuencia inequívoca de los efectos de construcción de itinerarios favorecidos (que desplazan la congestión a otros puntos) y de la respuesta de multiplicación del tráfico privado en situaciones de facilidad de desplazamiento (movilidad inducida).

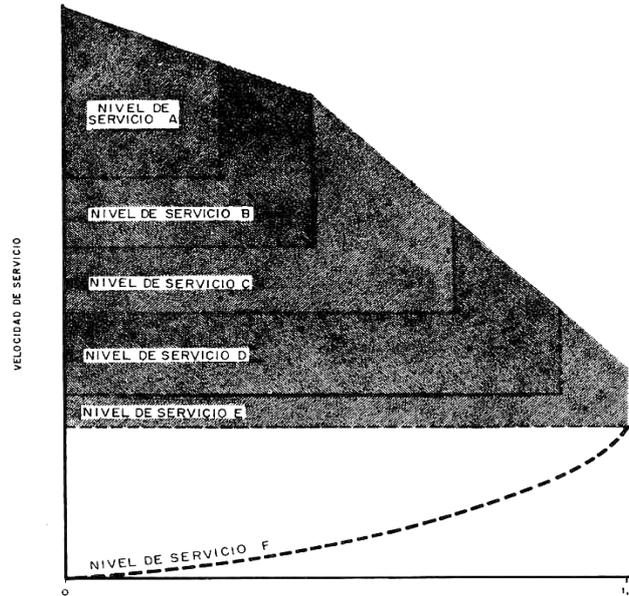
Y ello pone más de relieve las indeterminaciones derivadas de la medición de las velocidades en los arcos criterio (¿A que hora se deben medir?, ¿En que condiciones?), y, sobre todo, del establecimiento de velocidades diferenciales para arcos de nueva creación, dada la sensibilidad los modelos de asignación a pequeñas variaciones en la velocidad de los arcos.

En la actualidad, se intenta reducir dicha indeterminación por medio del uso de velocidades promedio medidas mediante un sistema GPS, no obstante, la tendencia a incrementar las velocidades para sustentar los resultados sigue estando presente y muchos estudios de dimensionado de vías plantean velocidades muy superiores a las velocidades promedio observadas en la red existente, con lo cual justifican la construcción de la vía, traduciéndose esto en estimaciones exageradas de capacidad.

8. Otro aspecto a destacar es que el hecho de adoptar las puntas de demanda de tráfico estimadas como criterio de dimensionado no solo implica desconocer el papel regulador que ejerce la congestión sobre la totalidad de la trama, con aprovechamiento de recorridos secundarios, sino que incluso es engañosa si se efectúa sobre las tablas de los manuales de

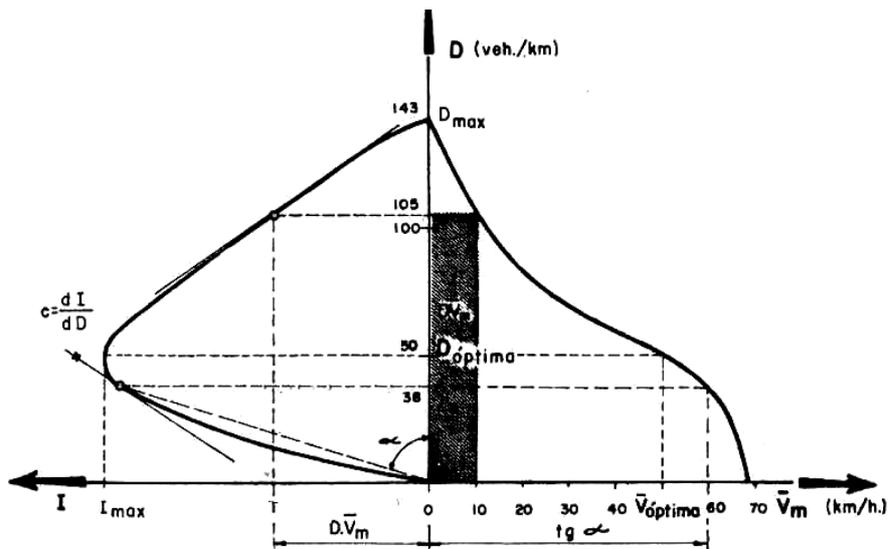
capacidad cuya simplicidad está ampliamente mostrada por teorías de circulación continua y formación de ondas.

Fig. 4.3.7. Velocidades adecuadas a cada nivel de servicio de funcionamiento de la vía



Fuente: VALDÉS, A. Ingeniería de Tráfico. Ed. Dossat, Madrid, 1971.

Fig. 4.3.8. Curvas de densidad-velocidad para estimar la capacidad de una vía



Fuente: C. Kramer: Carreteras: tráfico y trazado. Ed. Colegio Ing. Caminos, Madrid, 1.977.

La propia noción de nivel de servicio está inventada fundamentalmente para el tráfico urbano, aceptándose que en este medio se admiten, y son convenientes desde el punto de vista de la eficacia total del sistema, ciertos niveles de cogestión. Además al asignar con una sola velocidad estimada para vías proyectadas, no se tiene en cuenta un hecho comprobado: la capacidad de una vía es la misma para dos velocidades muy diferentes (cosa que determina el nivel de servicio a alcanzar); si la asignación se efectuara con la menor, y no la mayor de ellas, se aumentaría enormemente la capacidad del sistema viario, y, lo que es más importante, su seguridad.

9. Otro problema no bien resuelto en este enfoque es el de la estimación futura de las actividades, Si se opta por proyecciones de distribución de la población según las pautas observadas en el pasado, lógicamente seguirán creciendo las áreas centrales; si por el contrario, se sigue lo dispuesto en el PDM o en el POT, las zonas donde se concentrará el nuevo crecimiento serán las periféricas.

La decisión intermedia abre un enorme abanico de posibilidades. Los estudios que buscan justificar la ampliación de accesos se apoyan en proyecciones tendenciales que buscan reforzar la movilidad entre el sector centro y las zonas periféricas de concentración de población o de puestos de trabajo; por el contrario, cuando se busca sustentar una infraestructura como un anillo de ronda o una variante, los estudios optan por las proyecciones de los Planes de Ordenación Territorial.

Y no es un problema ni baladí ni fácil de resolver: La cuantía futura de las variables socio-económicas de las zonas es un dato del modelo (no un resultado) y ha de ser suministrado a éste, sin tener mecanismos internos de validación. Ello muestra la indeterminación de la estimación de las matrices de viajes de futuro, con un enfoque que ignora que la producción de actividades en cada zona va a depender de la propia construcción de infraestructuras.²⁷

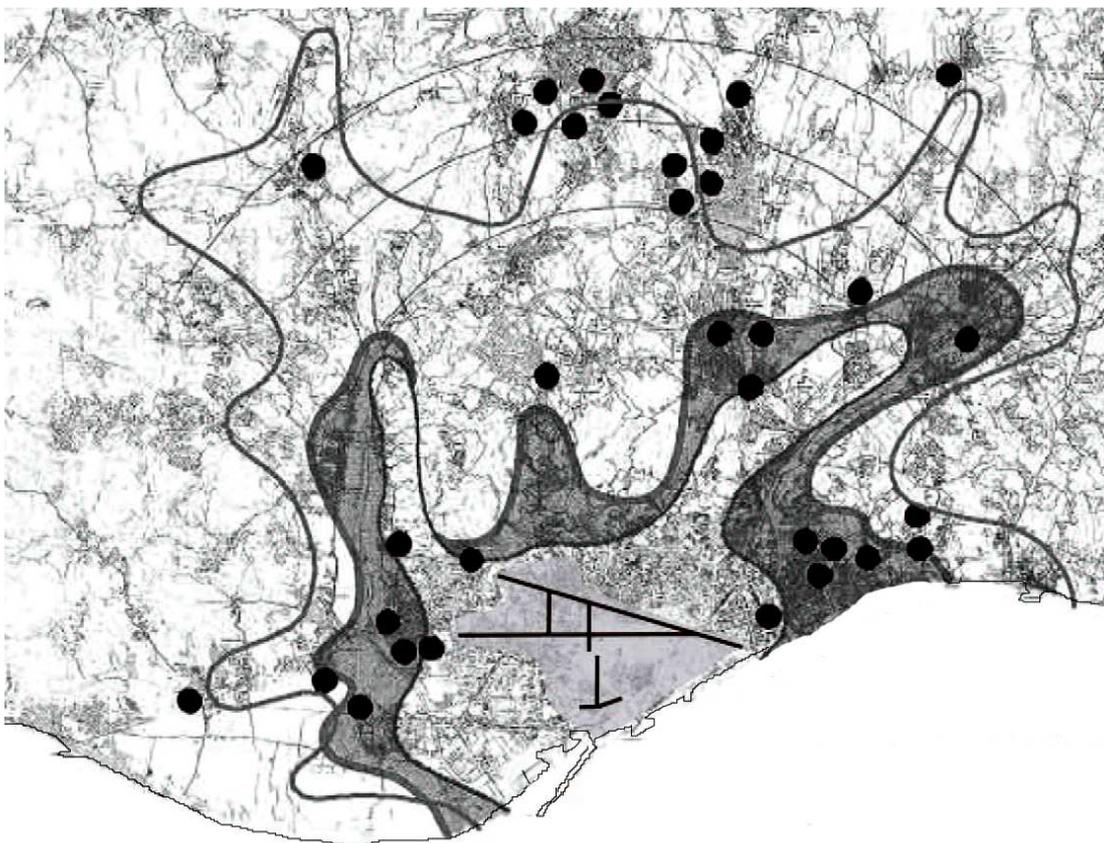
Porque mas allá de esas dificultades y de los trucos utilizados para resolverlas, lo que existe es un grave error conceptual: pensar que la localización de las actividades no dependerá de la forma y dimensionado de las redes de transporte, y segundo, la que se deriva de que el comportamiento de la demanda futura tendrá las mismas pautas de comportamiento del momento del análisis.

²⁷ MERLIN, P. Méthodes quantitatives et espace urbain. Ed. Masson, Paris, 1973

Pues el territorio se organiza sobre la base de la estructura de relación que le dan sus redes, y, por esa causa, resultan erróneos los métodos que miran a éstas como simple servicio demandado por una localización de actividades que suponen abstracta y con lógica de producción propia.²⁸

En conclusión, hay que recocer a este enfoque de la movilidad que ha aportado importantes instrumentos matemáticos que han permitido una mejor comprensión del funcionamiento de la movilidad y de ciudad. La crítica fundamental que se les puede aplicar es que, más allá de su colaboración a la cuantificación de flujos e interrelaciones urbanas suponen un enfoque erróneo de la función del planeamiento, que niega sus posibilidades de alteración del comportamiento espacial de la movilidad y de inducción de la localización de actividades.

Fig. 4.3.9. Localización de áreas comerciales en el entorno de las áreas con ganancia de accesibilidad por motivo de construcción de la red viaria básica de Barcelona 92.



Fuente: Cambios de topología de la red viaria y localización de actividades. Herce Asociados-Ayuntamiento de Barcelona, 1.995.

²⁸ HERCE, M. i MIRÓ, J. El soporte infraestructural de la ciudad. Ed. UPC, Barcelona, 2002.

4.4. CONSECUENCIAS DEL PLANTEAMIENTO DE DEMANDA Y DE SU CRISIS COMO INSTRUMENTO DE PLANIFICACIÓN.

Para comprender y analizar los resultados de esta lógica de entendimiento de las infraestructuras, es necesario realizar un breve balance de su aplicación a la planificación viaria urbana.

El enfoque seguido es aparentemente sencillo, preciso en sus resultados y permite comprobar hipótesis diferentes de red, proporcionando con ello una positiva valoración técnica, es decir, desde el punto de vista matemático y de modelación, el enfoque es adecuado; no obstante, los resultados de aplicación de éste han, paradójicamente, exagerado los comportamientos espaciales de la movilidad, los cuales en teoría se pretendían erradicar.

De hecho, el auge de los modelos de demanda ha coincidido con la dimensión más caótica de la construcción de la ciudad en su historia, entendiéndose las redes de infraestructuras como un fin en si mismas, desarticuladas entre ellas y por lo tanto magnificando sus requerimientos hasta expulsar cualquier otra visión del territorio y de sus recursos.

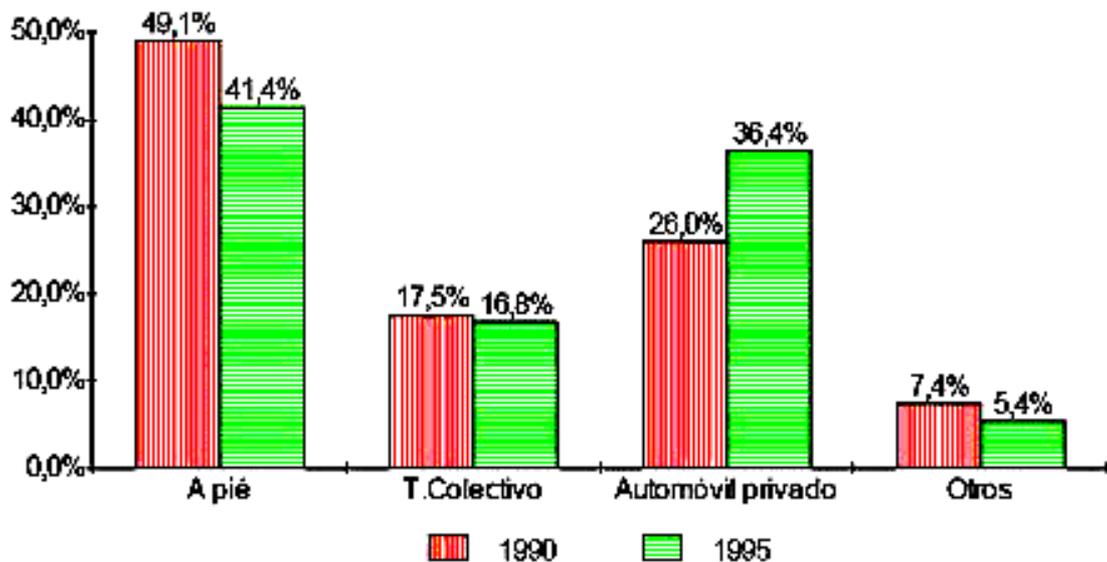
A pesar de las anteriores indeterminaciones, aún se observa cómo todas las estimaciones que sustentan políticas viarias dan resultados exagerados, colaborando a la necesidad de su construcción. Los defensores de este enfoque de demanda, le sustentan argumentando que a lo largo del tiempo se aprecia que las intensidades de uso de las infraestructuras son incluso superiores a las estimadas, lo cual es simplemente una consecuencia de la construcción de dicha infraestructura; se tiene entonces que hay un desplazamiento de la movilidad de otros lugares más congestionados, y sobre todo, se inducen nuevas actividades sobre el corredor ***pero no se ha hecho surgir una movilidad latente que se expresa por la facilidad del desplazamiento.***

La conclusión es que el vehículo privado ocupa todo el espacio que se le proporcione y es por esto que se hace necesaria una regulación del suelo urbano, con el fin de evitar la expulsión de las otras formas de desplazamiento que existen y que pueden ser usadas.

Por eso no es casual que su mayor aplicación haya estado al servicio de la construcción de accesos y rondas especializadas (normalmente autopistas) a la ciudad, de reforzamiento y

ampliación de vías básicas colapsadas, y en general de apoyo a políticas reforzadoras del papel del automóvil en la ciudad, que han ayudado a la extensión fragmentada de la ciudad y a la multiplicación de los denominados “commutings”, viajes concentrados en entradas y salidas en horas punta con consecuencia de congestión de la red.

Fig. 4.4.1. Evolución reciente del uso por modos en las ciudades españolas (el ejemplo del área metropolitana de Sevilla).



Fuente: Plan Intermodal de Transporte. Junta de Andalucía, 1.995

Las políticas de redes arteriales de la ciudad, fundadas sobre vías rápidas urbanas, sufrieron una fuerte contestación desde inicio de los años setenta, pero aún cuando la visión del cómo satisfacer la movilidad de una ciudad ha sufrido un importante vuelco conceptual desde entonces, el aparato analítico creado ha venido a constituirse en una suerte de patrimonio de la ingeniería que le dota de un cierto papel “científico” a la hora de validar operaciones viarias de dudosa eficacia urbana, pero de gran predicamento como obras de apoyo infraestructural y relanzamiento económico de muchas ciudades.

Los modelos de tráfico siguen utilizándose para la validación de ese tipo de obras, con una visión sesgada que las contempla en si mismas muy a menudo con abstracción del funcionamiento de la totalidad de la red; y, por ello, merece la pena indagar más atentamente en sus aspectos metodológicos más débiles y contestables.