

# Modelos de demanda de transporte

2 EDICIÓN

Juan de Dios Ortúzar



# Modelos de Demanda de Transporte

# Modelos de Demanda de Transporte

**Juan de Dios Ortúzar Salas**

**Segunda edición ampliada**



**ALFAOMEGA****Empresas del Grupo****COLOMBIA**

Alfaomega Colombiana S.A.  
Calle 62 No.20-46 esquina, Bogotá  
☎ (57-1) 746 0102  
cliente@alfaomegacolombiana.com

**MÉXICO**

Alfaomega Grupo Editor S.A. de C.V.  
Pitágoras 1139, Col del Valle de México D.F.  
C.P. 03100 • ☎ (52-55) 5089 7740  
Fax (52-55) 5575 2420 - 5575 2420  
Sin costo 01-800-020-4396  
libreriapitagoras@alfaomega.com.mx

**ARGENTINA**

Alfaomega Grupo Editor Argentino S.A.  
Paraguay 1307 P.B. of. 11, Buenos Aires  
☎ / Fax (54-11) 4811 7183 / 8352 / 0887  
ventas@alfaomegaeditor.com.ar

**CHILE**

Alfaomega Grupo Editor S.A.  
Dr. Manuel Barros Borgoño 21 Providencia, Santiago  
☎ (56-2) 235 4248 • Fax (56-2) 235 5786  
agechile@alfaomega.cl

www.alfaomega.com.co

**EDICIONES UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE**

Vicerrectoría de Comunicaciones  
Alameda 390, Santiago, Chile  
editorialedicionesuc@uc.cl  
www.ediciones.uc.cl

**Modelos de demanda de transporte**

Bogotá, Septiembre de 2015.

© Juan de Dios Ortúzar Salas

Derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente. No puede ser registrada por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electroóptico, fotocopia o cualquier otro, sin el previo permiso escrito de la editorial.

Edición original publicada por ©Ediciones Universidad Católica de Chile de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Edición autorizada para su venta en Latinoamérica y España.

Prohibida su venta en Chile.

*Edición*

© Ediciones Universidad Católica de Chile

*Diseño interior*

Francisca Galilea R.

*Portada*

Ana Paula Santander

ISBN: 978-958-778-021-5

Impreso en Colombia

Printed and made in Colombia

---

## AGRADECIMIENTOS

Este libro es el resultado de prácticamente cuarenta años de dedicación al tema, y constituye el texto guía del curso “Modelos de demanda de transporte”, que se ofrece regularmente a estudiantes de pre y posgrado de la Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Muchas personas e instituciones me han ayudado en distintas etapas de las investigaciones, cuyos resultados son la base de varios de sus capítulos. En particular deseo agradecer, en este sentido, la colaboración de mis exalumnos Francisco Javier Amador, Julián Arellana, Paula Armstrong, Roberto Bianchi, Víctor Manuel Cantillo, Juan Antonio Carrasco, Elisabetta Cherchi, Sebastián Caussade, Patricio Donoso, Patricia Galilea, Rodrigo Garrido, Rosa Marina González, Gloria Hutt, Andrés Iacobelli, Paula Iglesias, Ana María Ivelic, Marcela Munizaga, Sebastián Raveau, Luis Ignacio Rizzi, Mauricio Sillano, Ignacia Torres y María Francisca Yáñez, por su abnegada y eficaz labor como investigadores. También deseo destacar el constante apoyo del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (Fondecyt) y del Instituto Milenio en Sistemas Complejos de Ingeniería al desarrollo de estas investigaciones.

La preparación del material se ha beneficiado con la experiencia de realizar el curso a varias generaciones de estudiantes de pre y posgrado en esta universidad, y a mis alumnos del Programa de Maestría en Ingeniería de Tránsito y Transporte de la Universidad del Cauca en Colombia, del máster en economía de transporte de la Universidad Carlos III en Madrid, España; del curso intensivo de transporte urbano ofrecido por PTRC-SDG al gobierno mexicano; y de varios cursos cortos sobre estos temas organizados por amigos de las universidades de Cantabria, Burgos, Las Palmas de Gran Canaria, La Laguna, Politécnica de Cataluña, Politécnica de Madrid y Sevilla en España; Universidad de Porto, Portugal; Universidad Federal de Rio Grande do Sul,

Brasil; Universidad del Norte, Colombia; Universidad Autónoma del Estado de México, y University of Sydney y University of Western Australia. A todos ellos quiero extender mis sinceros agradecimientos. Finalmente, no puedo dejar de mencionar la importante experiencia adquirida durante la escritura de sucesivas versiones de nuestro libro *Modelling transport* con mi amigo Luis G. Willumsen, cuyas ideas han permitido mejorar significativamente varias secciones del texto.

En la parte de producción, deseo agradecer especialmente a Claudio Valeze, quien estuvo a cargo de la primera edición; a Lidia Bonet, quien colaboró en esta nueva edición; y a Jaime Fernández, quien preparó todos los gráficos y figuras originales. En toda esta labor se contó con el valioso apoyo de la Vicerrectoría Académica de esta universidad, a través del Fondo de Desarrollo de la Docencia.

Santiago, julio de 2012

# ÍNDICE

## CAPÍTULO 1

<b>INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS</b>	11
1.1 Características generales del transporte	12
1.2 El problema del transporte urbano	14
1.3 Estructura general del modelo de transporte urbano	22
1.4 Generalidades de modelación	27
1.4.1 Introducción	27
1.4.2 Formulación de modelos	29
1.4.3 Selección de un enfoque de modelación	32
1.4.4 Especificación de modelos	33
1.5 Errores de modelación y predicción	34
1.5.1 Clasificación de errores	34
1.5.2 Propagación de errores	36
1.5.3 El valor de mejorar los datos	38
1.5.4 Modelos simples versus modelos complejos	40
<i>Ejercicios</i>	42

## CAPÍTULO 2

<b>METODOLOGÍAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN</b>	45
2.1 Consideraciones prácticas	45
2.2 Redes, zonificación y periodización	46
2.2.1 Zonificación	47
2.2.2 Representación de la red	49
2.2.3 Elementos de periodización	50
2.3 Información por recolectar	51
2.3.1 Preferencias reveladas	51
2.3.2 Preferencias declaradas	69
2.3.3 Tratamiento y validación de la información	75
2.4 Conceptos básicos de muestreo	80
2.4.1 Consideraciones estadísticas en diseño de muestras	80
2.4.2 Selección y tamaño de muestra en encuestas domiciliarias	87
2.4.3 Selección y tamaño de muestra en encuestas de interceptación	95
2.4.4 Estrategia de muestreo en preferencias declaradas	98
2.5 Conceptualización del problema de muestreo	99
<i>Ejercicios</i>	107

## CAPÍTULO 3

<b>EL MODELO DE TRANSPORTE MODERNO</b>	113
3.1 Generación de viajes	117
3.1.1 Introducción	117
3.1.2 Producciones de viajes personales	120
3.1.3 Elasticidad de la generación de viajes	136
3.1.4 Actualización bayesiana de parámetros de generación	137
<i>Ejercicios</i>	139

3.2	Distribución de viajes	143
3.2.1	Matriz de distribución	143
3.2.2	Modelos alternativos de distribución	145
3.3	Modelos simplificados	176
3.3.1	Introducción	176
3.3.2	Estimación de matrices a partir de conteos de tráfico	178
3.3.3	Relleno de matrices	182
3.3.4	Modelos simplificados de partición modal	183
<i>Ejercicios</i>		185

## CAPÍTULO 4

<b>MODELOS DE ELECCIÓN DISCRETA</b>		195
4.1	Consideraciones generales	195
4.2	Algunas propiedades de los modelos desagregados	197
4.3	La teoría de la utilidad aleatoria	199
4.4	El modelo Logit múltiple	202
4.4.1	Derivación econométrica	202
4.4.2	Propiedades del MNL	205
4.4.3	Estimación estadística del MNL	206
4.4.4	Elasticidades del MNL	216
4.5	El modelo Logit jerárquico	217
4.5.1	Derivación	217
4.5.2	Versión utilizada en la práctica	221
4.6	Modelación con preferencias declaradas	226
4.6.1	Escalamiento o elección generalizada	226
4.6.2	Jerarquizaciones	229
4.6.3	Elecciones	229
4.6.4	Aspectos econométricos	230
4.7	El problema de agregación	234
<i>Ejercicios</i>		237

## CAPÍTULO 5

<b>OTROS TEMAS DE INTERÉS</b>		245
5.1	Predicción de tasa de motorización	245
5.1.1	Extrapolaciones en el tiempo	246
5.1.2	Métodos econométricos	249
5.2	El valor del tiempo de viaje	253
5.2.1	Introducción	253
5.2.2	Teoría microeconómica del valor del tiempo	254
5.2.3	Consecuencias prácticas para su estimación	256
5.2.4	Métodos de análisis	257
<i>Ejercicios</i>		259

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	261
---------------------	-----



## INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS BÁSICOS

El mundo, incluyendo los sistemas de movilidad en todas sus latitudes, cambia muy rápido. No obstante, y aunque las técnicas de planificación de transporte han experimentado fuertes transformaciones en las últimas décadas, los problemas de transporte, particularmente en el caso urbano, no han variado gran cosa a nivel mundial en más de 40 años. La congestión, la contaminación, los accidentes y el déficit financiero de las empresas municipales de transporte público siguen siendo hoy problemas tanto o más importantes que antes. No obstante, recientemente ha sido posible aprender bastante de un largo período de escasa planificación, limitada inversión, énfasis en el corto plazo y, en general, falta de confianza en la modelación y toma de decisiones estratégica, tanto en países en desarrollo como en muchos países industrializados. Se ha aprendido, por ejemplo, que los problemas básicos recién mencionados no desaparecen simplemente con la aplicación de mejores técnicas de gestión. De hecho, estos inconvenientes fundamentales tienden a reaparecer con mayor vigor, difundiéndose en áreas más amplias y tomando formas nuevas que resultan más difíciles de manejar.

Una dimensión adicional de lo anterior es que la mayoría de los países en desarrollo también sufren ahora con la congestión y contaminación urbana. Sus problemas de transporte ya no son solamente la falta de caminos para conectar áreas rurales distantes con sus potenciales mercados, sino que asimismo padecen los conflictos típicos del mundo industrializado. Pero además, los países en desarrollo tienen características distintivas que demandan un tratamiento específico: bajos ingresos, rápida urbanización y cambio, fuerte demanda por servicios de transporte público y escasez de recursos, incluyendo fondos para inversión, datos de buena calidad y personal calificado. Desgraciadamente, ya se han cometido serios errores; quizás el más paradigmático en China (por la enormidad de su economía), en que se reemplazó un modo sustentable, la bicicleta, por masas contaminantes de automóviles, en circunstancias de que se está viviendo la tendencia opuesta en los países más desarrollados.

En estos momentos, el mundo desarrollado pasa por una fase de mayor confianza en las soluciones técnicas que en las décadas anteriores, pero no es una confianza ciega en la tecnología como proveedora de soluciones mágicas para los problemas sociales y económicos, ya que igualmente se ha aprendido que este es un espejismo. Sin embargo, la computación y la electrónica han avanzado tanto que es posible pensar seriamente en nuevas concepciones de infraestructura de transporte (por ejemplo, sistemas guiados automáticos), sistemas de movimiento (sistemas de navegación vial y trenes completamente automatizados) y de pago electrónico (tarjetas inteligentes). Los celulares y servicios de GPS también cambian la manera en que es posible entregar información útil a los viajeros, facilitando el cobro y pago por el uso de facilidades de transporte. En particular, el advenimiento de los computadores de gran capacidad y bajo costo, ha descartado prácticamente el procesamiento de datos como cuello de botella en la planificación de transporte. De hecho, las principales limitaciones están ahora por el lado humano y técnico: la planificación de transporte contemporánea requiere profesionales muy bien preparados, y técnicas de modelación teóricamente sólidas, con implementaciones computacionales competentes.

Los inicios del siglo XXI parecen estar dominados por dos fuertes tendencias que afectan la vida y el progreso económico. La primera, y más fuerte, es la globalización, pero esta se ve apoyada e incentivada por una creciente capacidad de telecomunicación a precios cada vez más bajos. Esta poderosa combinación ha cambiado la forma en que percibimos y enfrentamos la mayoría de los problemas modernos, y su influencia en la planificación de transporte igualmente crece. Por ejemplo, ahora se entiende mejor el rol de una buena infraestructura de transporte en mejorar la competitividad económica; asimismo se ha logrado una mayor comprensión de las potenciales ventajas de incorporar al sector privado en la provisión y operación de infraestructura.

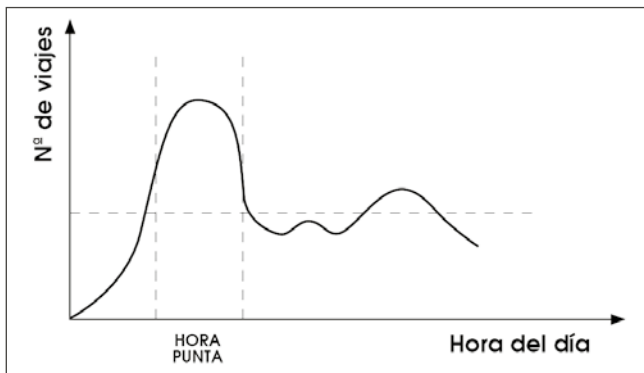
La planificación e implementación de proyectos tienen potencialmente el poder de cambiar el mundo. Para diseñar una metodología de planificación de largo plazo, adecuada para estos tiempos, es importante entender que esta no pasa únicamente por la capacidad de modelar el sistema. Los modelos solo serán útiles si se adoptan como una herramienta efectiva de apoyo a quienes deben tomar decisiones, en cuyo caso pueden cumplir –incluso– un rol principal en el proceso. Para esto es necesario disponer de planificadores expertos, buenos modeladores y sabios tomadores de decisiones. No parece lógico pensar que sea posible conseguir los primeros sin lograr antes una comprensión adecuada de las características fundamentales del sector que se analiza. Estas se resumen a continuación:

## 1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL TRANSPORTE

- a) El transporte es un bien altamente cualitativo y diferenciado: existen viajes con distintos propósitos, a diferentes horas del día, por diversos medios, para variados tipos de carga. Esto implica una enorme cantidad de factores difíciles de analizar

y cuantificar (por problemas de seguridad o comodidad, por ejemplo). Un servicio de transporte sin los atributos que satisfagan esta demanda diferenciada resultará completamente inadecuado.

- b) La demanda de transporte es derivada: los viajes se producen por la necesidad de llevar a cabo ciertas actividades (por ejemplo, trabajo, compras, recreación) en el destino. Esto es particularmente cierto en el caso de transporte de carga.
- c) La demanda de transporte está localizada en el espacio; para abordar este problema, el enfoque más común consiste en dividir el área de estudio en zonas y definir una red de transporte estratégica que facilite su procesamiento mediante programas computacionales. La espacialidad de la demanda suele producir problemas de des-coordinación que afectan el equilibrio oferta-demanda (taxis circulando vacíos en el centro de la ciudad y potenciales pasajeros esperando en otras áreas).
- d) La demanda de transporte es eminentemente dinámica y hay pocas horas disponibles para realizar las distintas actividades (ver Figura 1.1); desde el punto de vista de la oferta, el hecho que el transporte sea un servicio tiene la importante consecuencia de que no se pueden hacer reservas (*stock*) para ser utilizadas en períodos de mayor demanda. Por ende, si el servicio de transporte no se consume cuando se produce, sencillamente se pierde. Esto tiende a generar problemas en los períodos de punta en que existe una gran demanda y desequilibrios con respecto a los lapsos fuera de punta con menores requerimientos.



**Figura 1.1** Variación horaria de los viajes

- e) Para satisfacer la demanda de transporte y con el propósito de otorgar servicios, es necesario proveer infraestructura y disponer de vehículos que funcionen de acuerdo a ciertas reglas de operación. Comúnmente, la infraestructura y los vehículos no pertenecen ni son operados por la misma compañía o institución (de hecho, hasta hace pocos años la única excepción eran los ferrocarriles). Esta separación entre pro-

veedores de infraestructura y oferentes del servicio final, crea un complejo conjunto de interacciones entre autoridades de gobierno (central y local), empresas constructoras, operadores, viajeros y embarcadores, y público en general.

- f) La provisión de infraestructura de transporte (asociada a la oferta) se caracteriza por su carácter discreto; no tiene sentido proveer media pista de aterrizaje o un tercio de una estación, aunque en algunos casos cierta gradualidad es posible (por ejemplo, pasar de camino de tierra a ripiado, luego mejorar el trazado e incorporar más pistas, y finalmente pavimentar). Desgraciadamente, esto es mucho más difícil en el caso de aeropuertos, líneas de metro y otras obras de esta naturaleza.
- g) La construcción de infraestructura toma largo tiempo, ya que por lo general se trata de grandes proyectos que requieren gran cantidad de recursos. No es raro que la construcción de una instalación importante tome entre 5 y 15 años desde su etapa de planificación a su completa implementación. Esto significa que los estudios conducentes a la toma de decisiones deben hacerse con extremo cuidado y procurando evitar comprometerse con planes maestros o soluciones rígidas que no se adapten posteriormente a las condiciones cambiantes típicas de países como Chile.
- h) Finalmente, la oferta de transporte tiene asociadas una variedad de efectos concomitantes que pueden introducir fuertes distorsiones, tales como los accidentes, ruido, contaminación atmosférica y, en general, degradación del medioambiente. Rara vez se logra internalizar estos efectos, —esto es, los usuarios de los servicios no perciben ni pagan los costos que hacen incurrir a la sociedad—, lo que probablemente conduce a tomar decisiones que podrían ser mejoradas.

## 1.2 EL PROBLEMA DEL TRANSPORTE URBANO

La sociedad parece haber tomado conciencia de que los problemas de transporte, en general, no solo se han hecho más comunes, sino que han tomado mayor severidad que nunca, tanto en países industrializados como en países en desarrollo. Por ejemplo, en los últimos años —debido quizás a que no se ha experimentado escasez de combustibles—, el aumento del tráfico vial y de la demanda de transporte trajeron como consecuencias incrementos en la congestión, demoras, accidentes y conflictos ambientales, bastante mayores que lo considerado aceptable hasta la fecha, particularmente en las grandes ciudades.

Desgraciadamente, no es probable que estos problemas desaparezcan mágicamente en el futuro; por esto, es vital evitar cometer —en países en desarrollo— los mismos errores de los países industrializados, procurando atacar y resolver estos inconvenientes de manera creadora e inteligente.

Conceptualmente, el dilema del transporte urbano se puede explicitar de la siguiente forma (Manheim, 1973):

■ ■ ■ ■ ■

¿Cómo satisfacer la demanda de viajes de personas con muchos propósitos distintos, a varias horas del día y en diferentes medios, dada una red de transporte y un sistema de gestión; con una cierta capacidad de operación.

■ ■ ■ ■ ■

En este libro nos concentraremos en el transporte urbano de pasajeros, por ser el caso más complejo e ilustrativo; además, resultará interesante contrastar los modelos que examinaremos con las imágenes a priori que cada persona tiene del sistema, por ser esta una actividad tan común del diario vivir.

El sistema de transporte se puede definir como la interacción de:

- i) una red (infraestructura)
- ii) un sistema de gestión
- iii) un conjunto de medios que compiten o se complementan.

Tanto la red como los medios, aunque son elementos claves del sistema, no ofrecen dificultades conceptuales. El sistema de gestión es el elemento más oscuro, por lo que a continuación utilizaremos un modelo extremadamente simple para intuir ciertos aspectos de interés. Para esto, definamos:

$$v = f(K, V)$$

en que  $v$  es la velocidad en un enlace de la red;  $K$  es su capacidad y  $V$  es el volumen de tráfico que circula por este. De este modo, también se puede definir:

$$\bar{v} = f(K, V, G)$$

en que  $\bar{v}$  es la velocidad en la red y  $G$ , el sistema de gestión. En este contexto, notemos que la distancia ( $d$ ) puede expresarse como  $d = f(G)$ , particularmente en un sistema de vías unidireccionales.

Lo anterior nos permite visualizar que, aun cuando aumente la velocidad dado un sistema de gestión ( $G$ ) exitoso, es posible que se incremente el tiempo de viaje debido a mayor  $d$ ; y esto puede o no ser un problema.

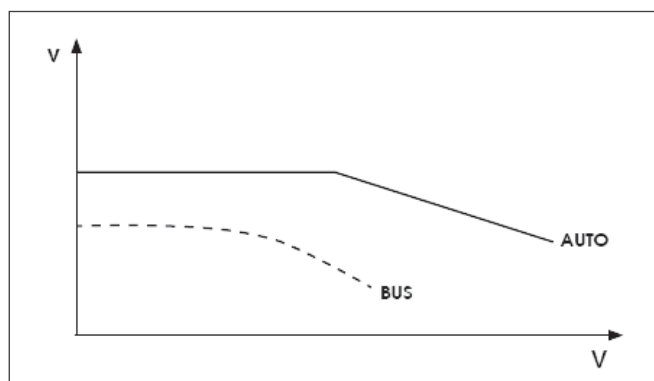
Por otro lado, la capacidad es claramente una variable que tiene cierto dinamismo; así, en el año,  $t$  se tiene:

$$K_t = f[\text{inversión } \{I_0, I_1, \dots, I_t\}]$$

y en general se cumple, en el corto plazo, que a mayor  $K$ , mayor  $v$ ; cabe notar que esto **no** es necesariamente cierto en el largo plazo. Dado un  $K$ , es necesario considerar que existen distintos tipos de vehículos que usan la red, luego el volumen circulante se puede descomponer en:

$$V = V_a + V_b + V_c$$

en que, por ejemplo,  $a$  = auto;  $b$  = bus;  $c$  = camión. Cada uno de estos vehículos tiene distintas características de operación, como se ejemplifica en la Figura 1.2.



**Figura 1.2** Curvas de flujo-velocidad por tipo de vehículo

Vale decir, es posible tener que:

$$V_a = f(K, V_a, V_b, V_c, G)$$

$$V_b = f_1(K, V_a, V_b, V_c, G)$$

Una de las soluciones parciales que se han aplicado en ingeniería de tránsito para resolver problemas de transporte, es otorgar prioridad a los buses mediante la asignación de

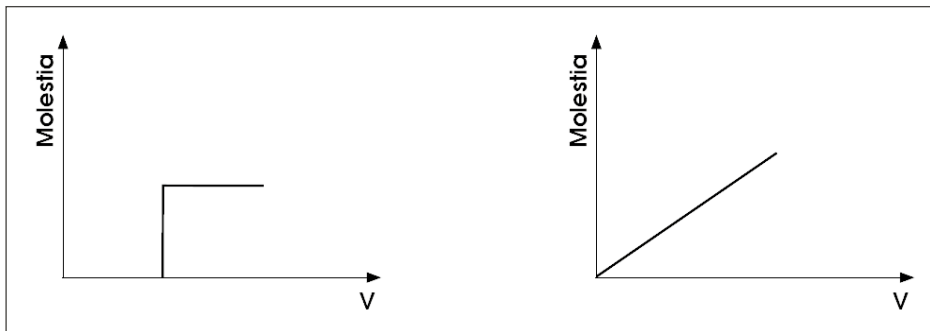
pistas exclusivas (*bus lanes*); en ese caso, se otorga un  $K_b$  a fin de mejorar  $v_b$ , haciéndola independiente de  $V_a$ .

Aunque lo anterior se puede complicar bastante más, preferimos mencionar otros dos inconvenientes de los sistemas de transporte que adquieren cada vez mayor importancia.

- a) Externalidades, tales como el problema de contaminación ambiental:

$$\text{Medioambiente} = f(\text{varias cosas}, V)$$

Desgraciadamente, de esto se sabe todavía relativamente poco. Ni siquiera se tiene claro, por ejemplo, cuál es la forma funcional más apropiada (ver Figura 1.3). Lo grave es que, dependiendo de esta forma, puede variar fuertemente el resultado de la evaluación socio-económica de un proyecto. Hasta ahora en muchos países, como Chile, no se incluyen las consideraciones ambientales directamente como ítems de costo-beneficio, sino como estándares que no se debieran sobrepasar.



**Figura 1.3** Posibles relaciones entre flujo y contaminación ambiental

- b) Efectos distribucionales: Interesa saber quiénes se verán afectados positiva y negativamente por determinadas políticas o proyectos.

Para entender mejor esto, es ilustrativo mencionar un caso real que ocurrió en Brasil hace muchos años. El gobierno municipal de Río de Janeiro decidió mejorar el acceso al trabajo de los habitantes de una favela (población callampa) muy cercana al centro; sin embargo, al poco tiempo de construir una autopista urbana para este efecto, se erradicó la favela y se construyeron en su lugar varios hoteles de lujo.

Después de estas consideraciones, volvamos al problema del transporte urbano y sus potenciales soluciones. A principios de los sesenta, sir Colin Buchanan, en su notable informe *Traffic in towns*, demostraba que no era posible acomodar todos los viajes de

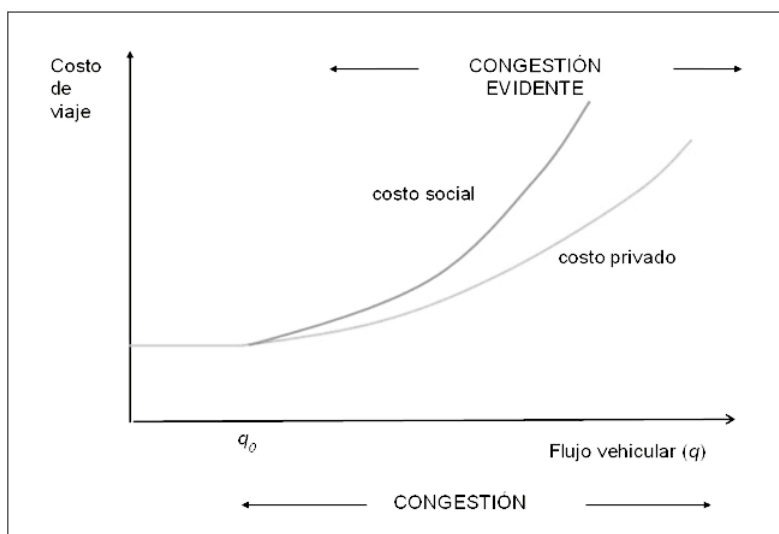
una ciudad mediana si estos se debían realizar en auto (vale decir, la estrategia implícita de ciudades como Caracas o Los Ángeles).

Curiosamente, muchos ediles de ciudades en países en desarrollo ignoran no solo esta demostración teórica, sino asimismo la amplia evidencia empírica que demuestra que las soluciones que van por el lado de favorecer el uso del automóvil, inevitablemente conducen al fracaso.

En ingeniería de tránsito se calcula el grado de saturación ( $x$ ) de las vías como la razón entre el flujo de vehículos ( $q$ ) que circula por ellas y su capacidad ( $s$ ). Existe congestión evidente cuando  $x$  es superior a 0,7 y esta se calificar de caótica (como en varias ciudades de Estados Unidos, Sao Paulo o Bangkok) a partir de 0,9.

El costo más visible de la congestión (aunque ciertamente no es el único), y básicamente lo que más interesa a los usuarios, es el aumento del tiempo de viaje. Sin embargo, cada persona percibe solo parte del fenómeno: el efecto de la congestión sobre su viaje y no el efecto de su viaje sobre la congestión.

En la Figura 1.4, se ve que al comenzar la congestión (flujo  $q_0$ ), el tiempo medio de viaje (costo privado percibido por el usuario) efectivamente crece, ya que la presencia de vehículos adicionales impide el libre flujo, disminuyendo la velocidad; pero, más importante, es que igualmente aumenta, y de modo más rápido, el tiempo adicional que agrega la presencia de un nuevo vehículo en la vía al tiempo de los restantes automóviles que circulan por ella. Este costo marginal (o costo social), desgraciadamente no es percibido por los usuarios.



**Figura 1.4** Costos privados y sociales sin y con congestión



Por otro lado, como el flujo vehicular está compuesto de autos, buses y camiones, en los cálculos de capacidad y congestión en ingeniería de tránsito se utiliza el concepto de vehículo equivalente (v.eq.). En términos de ocupación del espacio vial, un auto circulando es igual a 1,0 v.eq. y un bus urbano es del orden de 2,5 v.eq. Esto permite deducir algo muy interesante; en Santiago, por ejemplo, los autos transportan en promedio cerca de 1,25 pasajeros por viaje y la tasa de ocupación media de un bus es aproximadamente 40 pasajeros. Por ende, un bus es alrededor de 12 veces más eficiente que un auto en términos de congestión (uso del escaso espacio vial).

## Potenciales soluciones al problema

Para aproximarse a resolver el problema de congestión, es importante entender que en redes urbanas la capacidad vial está determinada por las intersecciones semaforizadas, en que se cumple:

$$x = \frac{q}{\lambda s}$$

donde  $\lambda$  es la proporción de tiempo de verde del semáforo en ese arco de acceso. Esta simple ecuación permite ver fácilmente que para reducir la congestión (el valor de  $x$ ) hay únicamente tres posibilidades:

1. mejorar la gestión de la red (aumentar  $\lambda$ ); ahora, como  $\lambda = 1$  en el caso de pasos a desnivel, en este tipo de intersecciones solo quedarían las dos primeras opciones;
2. aumentar la capacidad ( $s$ ); que es la solución más socorrida y que podríamos caricaturizarla como la “solución del hombre de la calle”; y
3. reducir el flujo vehicular ( $q$ ); esto es, algunos usuarios de auto debieran cambiar de modo, hora o ruta (gestión de la demanda).

La ecuación anterior muestra que la solución de “sentido común” (reducir la congestión vía construcción de infraestructura) parecería tener algún asidero en el corto plazo; sin embargo, existen varias paradojas (ver por ejemplo, Dawns, 1962; Murchland, 1970) que ilustran por qué esta opción ha demostrado ser no solo prohibitivamente cara, sino totalmente ineficaz en la práctica. Por lo demás, esto fue demostrado teóricamente, como ya comentamos, hace casi 50 años (Buchanan, 1964), pero no es fácil convencer a quienes toman decisiones, particularmente en países en desarrollo.

Por lo tanto, la única manera remanente de atacar el problema de congestión urbana, es convencer a los usuarios de auto que no utilicen este medio en forma indiscriminada; para esto, lamentablemente, se necesita una política de “garrote y zanahoria”.

## La propuesta de los especialistas

A diferencia de los bienes privados, los servicios tales como agua, electricidad, teléfonos y, por supuesto, las vías urbanas, son bienes públicos. Se puede demostrar que si un bien público está congestionado, debe ser tarifado a costo marginal para conseguir una asignación óptima de recursos. Es curioso constatar que esto ocurre en el caso de todos los bienes públicos anteriores, exceptuando las vías urbanas.

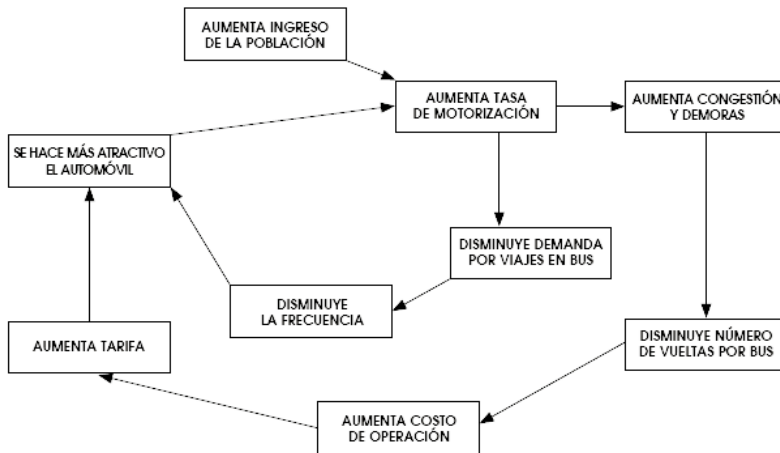
La tarificación vial, o tarificación por congestión (el “garrote”), consiste precisamente en cobrar por el uso de vías congestionadas para que sus usuarios perciban el costo social (marginal) de viajar por ellas, y tomen sus decisiones de elección de ruta, modo de transporte, hora de partida del viaje, etc., en forma eficiente. La cantidad por cobrar, dado un flujo determinado, es igual a la diferencia entre el costo social y el costo privado de viaje (ver Figura 1.4). Esto, desgraciadamente, no es fácil de implementar en la práctica y por esto se han diseñado aproximaciones, algunas de gran complejidad técnica, que ya se aplican en varias ciudades del mundo (Singapur, Oslo, Teherán y, desde hace varios años y con gran éxito, Londres).

La opinión prácticamente unánime de los especialistas es que la única manera de atacar de modo serio el problema de la congestión vehicular en las ciudades, consiste en proveer un buen sistema de transporte público (digno, eficiente y seguro), la “zanahoria”, unido a un sistema de tarificación vial en las rutas o áreas congestionadas de la ciudad. Si estos dos elementos no forman parte de la estrategia para atacar la congestión, se garantiza que esta no tendrá resultado.

En particular, resolver la congestión a partir de la construcción de nueva infraestructura (como las muy cuestionadas autopistas urbanas o la lamentable política de reducir áreas verdes para ensanchar calles existentes) no solo es excesivamente caro, sino que posiblemente tienda a exacerbar el inconveniente, ya que constituye una señal a favor del uso del auto y un agravante del “círculo vicioso del transporte público”, que discutiremos a continuación.

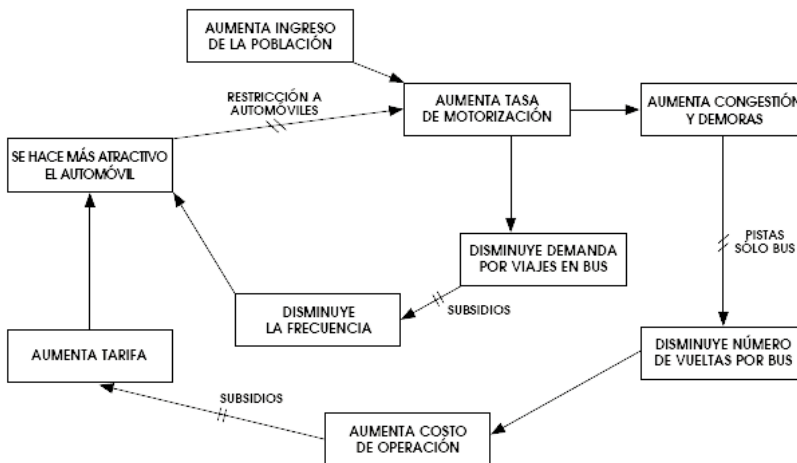
## Círculo vicioso del transporte público

La Figura 1.5 ilustra de manera simplificada el fenómeno de crisis del transporte público que se ha experimentado en los países industrializados, y que –desgraciadamente– se repite de modo muy similar en los países en desarrollo.



**Figura 1.5** Círculo vicioso del transporte público

La Figura 1.6 ilustra el tipo de políticas desarrolladas para romper este círculo vicioso; cabe destacar como más exitosas a las de naturaleza operacional (pistas solo para buses, restricción de automóviles), ya que las de tipo financiero (subsídios) tienden a producir enormes déficits fiscales de difícil solución posterior.

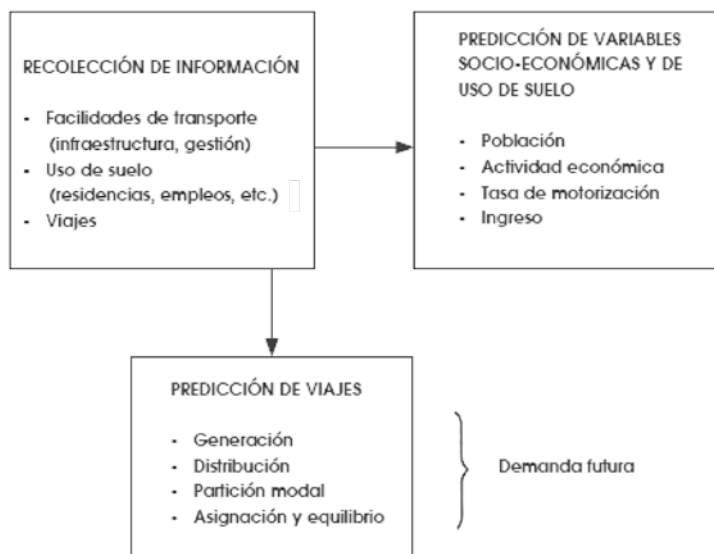


**Figura 1.6** Rompiendo el círculo vicioso

Es importante señalar que en países como Chile, donde afortunadamente una importante proporción de los viajes urbanos aún se realiza en transporte público, todavía estamos a tiempo de evitar seguir cometiendo los errores de los países industrializados; para esto se debe desincentivar el uso del automóvil particular y mejorar sustantivamente los sistemas de buses y transporte masivo, a fin de que se constituyan en reales alternativas de solución al problema del transporte urbano.

### 1.3 ESTRUCTURA GENERAL DEL MODELO DE TRANSPORTE URBANO

Desde la década de 1950 se han realizado, en muchas ciudades del mundo, complejos estudios de planificación de transporte urbano (tres solo en Santiago, en algo más de 30 años), que han dado como fruto secundario –pero importante– el establecimiento de una metodología de análisis relativamente estándar. Aun cuando se han producido fuertes avances en sus componentes, la estructura general del modelo ha variado relativamente poco en el tiempo. Básicamente, esta ha comprendido los cuatro submodelos que se ilustran en la Figura 1.7; no obstante, en los últimos años se ha incorporado (aunque aún existen muy pocas aplicaciones en la práctica) un nuevo submodelo, “elección de la hora de salida del viaje”, que debiera tomar cada vez mayor importancia en la medida en que la congestión continúe aumentando y políticas como la tarificación vial sigan ganando adeptos a nivel mundial.



**Figura 1.7** Estructura general del modelo de transporte

Este modelo ha estado inserto en un proceso de planificación, que podríamos calificar de normativo (Ortúzar y Willumsen, 2011), como el que se ejemplifica en la Figura 1.8. Los pasos fundamentales de este proceso son los siguientes:

- a) **Formulación del problema.** En general, los problemas se definen como una contradicción entre expectativas y realidad percibida; una definición formal debe hacer referencia a objetivos, estándares y restricciones (financieras, temporales, sociales, geográficas y técnicas).

Como el sistema es muy complejo (interacción entre personas y actividades), cualquier modelo debe partir por escoger el mínimo nivel de análisis que permita resol-

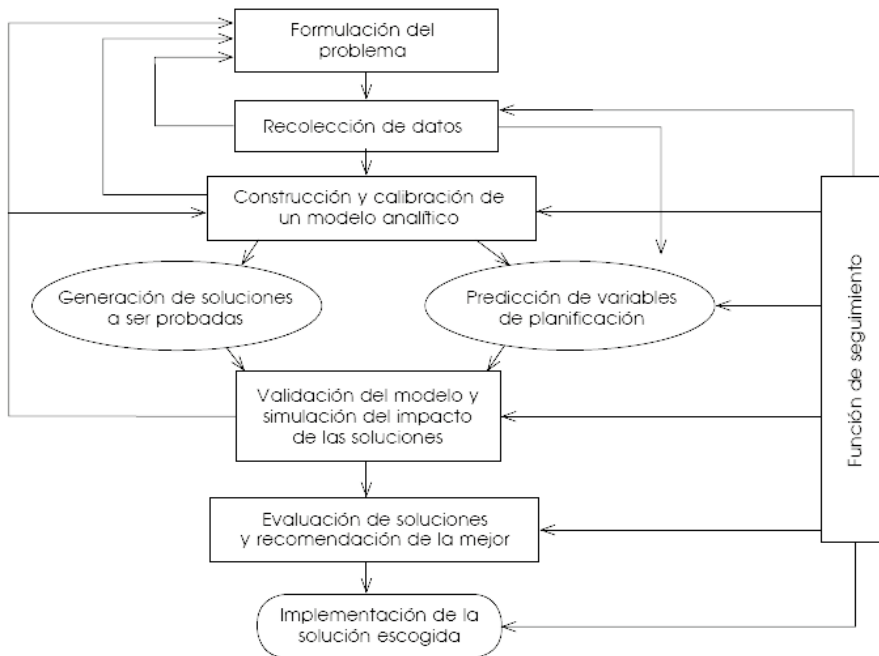
ver el problema. La tarea de modelación será más o menos difícil, dependiendo del nivel de análisis (por ejemplo, estratégico o grueso versus local o detallado). Para definir el problema es necesario:

■ ■ ■ ■ ■

explicitar los objetivos que se desea alcanzar; considerar las restricciones existentes; tener claro cuáles son las variables de decisión y ser capaz de especificar funciones de valoración y criterios de decisión.

■ ■ ■ ■ ■

Por funciones de valoración, entendemos relaciones tales como el valor del tiempo, el valor de la vida humana, de reducir los accidentes graves, de la mano de obra no calificada, de la contaminación, etc. Los criterios de decisión tienen que ver, por ejemplo, con la elección de reglas compensatorias o lexicográficas (tales como la “eliminación por aspectos”) para considerar los distintos ítems de beneficio en la evaluación. La regla más típica es la compensatoria, mediante la cual proyectos con alto beneficio por algún ítem, serán escogidos, aunque tengan muy poco beneficio (o incluso pérdidas) en otros.



**Figura 1.8** Proceso de planificación

- b) **Recolección de datos** acerca del estado actual del sistema de interés, para apoyar el desarrollo de los modelos analíticos.
- c) **Construcción y calibración de un modelo analítico** del sistema de interés. En general, se procura elegir la función más simple que trate adecuadamente el problema. Esta etapa implica especificar el modelo, estimar sus parámetros y, ojalá, examinar su capacidad predictiva con datos independientes.
- d) **Generación de soluciones para ser probadas.** Normalmente, estas serán provistas por las instituciones interesadas en solucionar determinados problemas (planificadores locales, empresas de transporte público, grupos de presión). Las alternativas deben ser diseñadas de modo que cumplan con los objetivos sin violar las restricciones.
- e) **Predicción de variables de planificación.** Estas son las entradas (variables independientes) del modelo; para predecirlas, se recurrirá a escenarios de planificación alternativos o, idealmente, a modelos (más complejos y hasta hace poco de dudosa credibilidad, ver Martínez, 1992) de la evolución de la población, del empleo, ingreso y uso de suelo.
- f) **Validación del modelo y simulación de impactos.** El comportamiento del modelo debe examinarse bajo diferentes escenarios para evaluar su robustez y razonabilidad. Luego se utilizará para simular el impacto de la aplicación de distintas políticas en términos de indicadores adecuados. El análisis (que es lo que más nos interesa en este texto) consiste en predecir las características de operación, beneficios y costos de cada alternativa.
- g) **Evaluación de soluciones y recomendación de un plan o estrategia.** Esta etapa requiere de una evaluación operacional, económica, financiera y social de las alternativas de acción a la luz de los indicadores producidos por el modelo. Para la evaluación y selección, se emplea el análisis de costo-beneficio. Un problema serio son los elementos no cuantificables. Por esto, entre otras cosas, las decisiones son finalmente políticas. El analista ayuda, proporcionando información lo más objetiva posible y criterios técnicos; el político o gobernante, que es quien toma las decisiones, puede, además, tener en cuenta otras cosas. Esto es muy importante, dadas las suposiciones e hipótesis en que normalmente se basa el análisis técnico.

Un problema grave, que únicamente pueden resolver los políticos, es la existencia de objetivos conflictivos: no solo los típicos dilemas de cómo aumentar la velocidad y disminuir los accidentes, por ejemplo, sino el de analizar quién gana y quién pierde con determinadas soluciones.

- h) **Implementación de la solución escogida.** Esta comúnmente requerirá la resolución, en el camino, de una serie de inconvenientes prácticos no considerados en la fase de diseño. Para esto es importante contar con un equipo humano adecuado en el organismo encargado de ejecutar el plan y esto no es fácil en países en desarrollo.

Este marco general puede ser utilizado tanto para formular un plan maestro como para apoyar el proceso de negociación inherente a un estilo de decisión adaptativo. Es importante destacar que asume, en forma implícita, no sólo que el problema puede ser completamente especificado, sino que las restricciones y el espacio de las decisiones pueden ser definidos, y que la función objetivo puede ser identificada.

Un problema del enfoque es que los sistemas de transporte reales no se comportan bien en este sentido; por ejemplo, las funciones objetivo y las restricciones son a menudo difíciles de definir. Es más, muchas veces al reducir un problema de transporte podemos llegar a creer que hemos sido capaces de resolverlo, pero los conflictos suelen reaparecer en lugares diferentes y bajo formas distintas. A medida que progresa nuestro entendimiento del sistema, se añaden nuevas aristas y aparecen nuevas perspectivas; cambios inesperados e imprevisibles en factores externos o variables de entrada pueden descarrilar al plan más detallado. Un marco de decisión normativo, fuerte y rígido, será adecuado para tratar problemas simples, bien definidos y con restricciones claras, pero es de escasa utilidad en el tratamiento de cuestiones tan ricas, complejas y multifacéticas como las asociadas al transporte.

Con el fin de mejorar el enfoque, potenciándolo para lidiar con un mundo en constante cambio, es esencial reconocer que el futuro es mucho más tenue de lo que nuestros modelos de predicción nos pueden llevar a creer. Si este es el caso, los planes maestros se deben revisar a intervalos regulares y otras estrategias de toma de decisiones deben ser apoyadas con la inclusión de información fresca, recolectada en forma periódica con el propósito de verificar el proceso y corregir su curso cuando sea necesario. En este sentido, estilos de decisión adaptativos o mixtos (Ortúzar y Willumsen, 2011), más flexibles, parecieran ajustarse mejor a las características de los sistemas de transporte. Estos estilos reconocen la necesidad de redefinir de manera continua los problemas, los escenarios de negociación y los objetivos, a medida que los conflictos se entienden de mejor modo; lo anterior lleva, a su vez, a identificar nuevas estrategias de solución, a responder creativamente a cambios políticos y tecnológicos, y a mejorar las capacidades de modelación a través del entrenamiento y la experiencia.

La introducción de una función de seguimiento es un importante aporte al esquema de planificación clásico. Un sistema de seguimiento no está restringido solamente a una recolección periódica de información; debiera también facilitar otras etapas del marco de toma de decisiones, como se sugiere en la Figura 1.8. Un sistema de seguimiento tendría que cumplir dos roles claves. En primer lugar, proveer información que permita identificar desvíos del comportamiento esperado del sistema de transporte y/o de variables exógenas importantes, tales como la población o el crecimiento económico. En segundo lugar, los datos recolectados debieran ser de utilidad en la revalidación y mejoramiento del modelo utilizado para evaluar los planes.

Un buen sistema de seguimiento debiera también asimismo facilitar un proceso de aprendizaje por parte del equipo planificador, generando ideas sobre cómo mejorar y modificar los modelos. En este sentido, perturbaciones importantes al sistema de transporte (tales como las que se producen en un paro de locomoción colectiva o cuando hay trabajos de reparación de vías de gran magnitud), que temporalmente cambian la estructura de la red de transporte y sus características, debieran constituir una importante fuente de información para contrastar las predicciones del modelo con el comportamiento de los viajeros. Experimentos no planificados, como los anteriores, permiten validar y mejorar los modelos; por lo tanto, si no existe un sistema de seguimiento, este debiera establecerse como parte de cualquier estudio de transporte.

El seguimiento de planes, y en general del comportamiento de un sistema de transporte, es una función tan importante, que amerita influir en la elección de los modelos para apoyar la planificación y toma de decisiones. El uso de modelos que sean reutilizables y actualizables, mediante datos de bajo costo fáciles de recolectar, parece particularmente apropiado para esta labor. Obviamente, modelos de esta naturaleza no pretenden proveer toda la riqueza de comportamiento de otros enfoques más detallados. Sin embargo, existe un campo de acción para combinar ambas técnicas, que consiste en aplicar la herramienta de mejor resolución a las partes críticas del problema, para luego usar herramientas más gruesas, pero más simples de actualizar, para monitorear el progreso e identificar cuándo se requiere un nuevo esfuerzo de modelación detallado.

La adopción de una función de seguimiento permite implementar un proceso de planificación continua, contrastable con el esquema convencional, que comienza por gastar una suma considerable de recursos en un corto período (uno o dos años), para realizar un estudio de transporte de gran escala. El frenesí de actividad que esto conlleva puede ser seguido de un período, mucho más largo, de esfuerzo limitado en términos de planificación o revisión de planes. Pronto los informes y el plan maestro entran en obsolescencia o simplemente son olvidados, y nadie capaz de operar los modelos permanece en la unidad de planificación. Algunos años más tarde se realiza un nuevo gran esfuerzo de modelación y planificación, y el ciclo se repite. Este estilo, “a saltos y a brincos”, desperdicia recursos, no incentiva el aprendizaje y la adaptación como habilidades de planificación, y aliena a los analistas de los problemas reales. El enfoque tradicional es particularmente doloroso en países en desarrollo, ya que estos no poseen recursos para malgastar, y sus rápidos procesos de cambios apuran el desuso de planes y datos.

Por otro lado, en los últimos años ha habido un fuerte cambio de énfasis respecto a cuáles constituyen políticas de interés, ya que:

- Hace 40 años o más se tenía fe en que era posible predecir razonablemente bien el futuro; por ejemplo, se pensaba en crecimientos estables del PGB.
- No se prevenían, en aquellos años, conflictos tales como la crisis del petróleo o del medioambiente; estos eran solo escenarios exagerados de librepensadores radicales.



Sin embargo, hoy pocos creen, realmente, que sea posible predecir razonablemente a más de tres o cuatro años plazo (de hecho el problema no está en los modelos, sino en las variables independientes de política que constituyen sus entradas); los países crecen poco, no hay mucho dinero (salvo para la carrera armamentista), hay escasez de petróleo y una gran preocupación por el medioambiente.

Esto se puede constatar en el siguiente paralelo:

Políticas pasadas	Políticas actuales
• grandes autopistas	• gestión de tránsito
• sistemas de metro	• restricción y tarificación

Lo que sucede es que quienes tomaban decisiones hace 40 años, cuando el futuro parecía claro, no sabían de los resultados de estos grandes proyectos hasta muchos años después (cuando ya habían terminado su mandato), por lo que no eran juzgados por sus posibles errores. Hoy pocos se atreven a tomar grandes decisiones, ya que el futuro es sumamente incierto. Por lo tanto, se enfatizan las correcciones para optimizar lo existente en el corto plazo.

## 1.4 GENERALIDADES DE MODELACIÓN

### 1.4.1 Introducción

Hasta ahora hemos utilizado los conceptos de modelo y modelar, pero no lo definimos formalmente. Un modelo es, esencialmente, una representación de la realidad, una abstracción que se utiliza para lograr mayor claridad conceptual acerca de la misma, reduciendo su variedad y complejidad a niveles que permitan comprenderla y especificarla de manera adecuada para el análisis (ver Figura 1.9).



**Figura 1.9** Relación modelo-realidad

Normalmente, en un modelo se expresan en forma simplificada las características más relevantes (para el caso estudiado) de un cierto fenómeno o situación real. Existen varios tipos de modelos, por ejemplo:

- **Modelos físicos**, tales como maquetas arquitectónicas, túneles de viento o modelos de canales y represas en ingeniería hidráulica. Estos son adecuados para tratar ciertos problemas físicos, pero están claramente limitados al aspecto de diseño.
- **Modelos abstractos**. En estos casos, la situación real se representa por símbolos y no por mecanismos físicos. De este modo son mucho más útiles para el planificador, ya que trasladan su atención desde los aspectos tridimensionales del diseño a la representación de relaciones funcionales y a los procesos básicos de cambio en los sistemas analizados.

Los modelos abstractos permiten investigar el comportamiento del sistema y sus reacciones frente a determinados estímulos; además, son mucho más comunes que los modelos físicos. Baste pensar, por ejemplo, en el modelo mental que cada uno tiene del mundo que lo rodea; hacemos uso de la razón continuamente para evaluar cursos de acción alternativos y tomar decisiones.

Dentro de los modelos abstractos se sitúan los modelos matemáticos. En estos, las relaciones postuladas se formalizan en series de ecuaciones algebraicas que contienen dos tipos de variables:

- **Las exógenas**, independientes o explicativas, cuyos valores numéricos se determinan fuera del modelo; estas se pueden dividir, a su vez, en variables de política —esto es, variables bajo el control del modelador— y en variables adicionales.
- **Las endógenas** o dependientes, cuyo valor resulta de la operación del modelo.

El problema básico de la modelación lo constituye la estimación de las variables endógenas. La calidad de los resultados depende de:

- **Las suposiciones** (implícitas y explícitas) que se hayan realizado para especificar las variables exógenas; y
- **La forma funcional** que se haya supuesto para las interrelaciones contenidas en el modelo.

Dentro de los modelos matemáticos, a su vez, se distinguen:

- **Modelos predictivos**, que buscan determinar la causalidad entre las variables, con el fin de plantear relaciones funcionales que tengan una cierta constancia en el tiempo.