



ISSN 0188-7297



ESTUDIO DE LA DEMANDA DE TRANSPORTE

Víctor M. Islas Rivera
César Rivera Trujillo
Guillermo Torres Vargas

Publicación Técnica No. 213
Sanfandila, Qro, 2002

**SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES
INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Estudio de la demanda
de transporte**

**Publicación Técnica No. 213
Sanfandila, Qro, 2002**

Este trabajo fue realizado en la Coordinación Operativa del Instituto Mexicano del Transporte por Víctor M. Islas Rivera, César Rivera Trujillo y Guillermo Torres Vargas, se agradece el apoyo proporcionado por Salvador Hernández García para la edición del documento.

Índice

| | |
|--|-----------|
| Resumen | IX |
| Abstract | XI |
| Resumen ejecutivo | XIII |
| 1 Introducción al análisis oferta-demanda en el transporte | 1 |
| 1.1 El mercado | 2 |
| 1.2 La demanda y oferta del transporte..... | 2 |
| 1.2.1 La demanda | 3 |
| 1.2.2 La oferta | 4 |
| 1.3 Equilibrio en el mercado..... | 5 |
| 1.4 Unidades de la oferta y demanda de transporte..... | 8 |
| 1.5 Ejemplo de aplicación: equilibrio entre la demanda y la oferta de transporte...9 | |
| 2 La demanda de transporte: características económicas..... | 11 |
| 2.1 Análisis de la demanda de transporte | 11 |
| 2.1.1 Factores que determinan la demanda de transporte..... | 12 |
| 2.1.2 La importancia del valor del tiempo en la demanda de transporte | 15 |
| 2.1.3 Variación de la demanda..... | 16 |
| 2.2 Patrones de demanda no influenciados por los operadores..... | 18 |
| 2.2.1 Demanda en periodos de máxima demanda..... | 18 |
| 2.2.2 Cambios en los hábitos sociales | 18 |

| | |
|---|----|
| 2.2.3 Cambios en los precios y calidades de servicio de los competidores | 18 |
| 2.2.4 Cambios en la distribución de la población | 18 |
| 2.3 ¿Porqué el problema de la concentración de la demanda es particular- mente malo en el transporte?..... | 19 |
| 2.4 La elasticidad de la demanda..... | 20 |
| 2.4.1 Tipos de elasticidad..... | 20 |
| 2.4.2 La medición de la elasticidad de la demanda..... | 21 |
| 2.4.2.1 Elasticidad precio de la demanda..... | 21 |
| 2.4.2.2 Elasticidad precio cruzada..... | 28 |
| 2.4.2.3 Elasticidad ingreso | 30 |
| 2.4.2.4 Elasticidad de servicio | 30 |
| 2.4.3 La elasticidad y el ingreso total | 32 |
| 2.4.4 Modelos de demanda y cálculo de su elasticidad | 33 |
| 2.4.4.1 Modelo de elasticidad constante | 33 |
| 2.4.4.2 Modelos de elasticidad variable | 34 |
| 2.4.5 Casos de aplicación | 34 |
| 2.5 Excedente del consumidor | 36 |
| 2.6 Análisis preliminar de la oferta de transporte | 39 |
| 2.6.1 El origen de la oferta | 39 |
| 2.6.2 Diferencias modales..... | 40 |
| 2.6.3 El exceso de oferta de transporte..... | 41 |
| 2.6.4 Elasticidad de la oferta | 41 |
| 2.6.4.1 Definición de la elasticidad de la oferta | 41 |
| 2.6.4.2 Factores que determinan la elasticidad de la oferta | 42 |
| 2.6.5 El análisis de los costos de la oferta..... | 43 |
| 2.7 Ejercicios de aplicación | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 2.7.1 Servicio de autobuses: cálculo de elasticidad | 44 |
| 2.7.2 Servicio ferroviario: cálculo de elasticidad..... | 45 |
| 2.7.3 Ejemplo de cálculo de ingreso total..... | 46 |
| 2.7.4 Ejemplo de función de demanda con costo generalizado | 47 |
| 2.7.5 Otro ejemplo de elasticidades | 49 |
| 2.7.6 Otro ejemplo de ferrocarriles | 50 |
| 2.7.7 Cálculo de elasticidad y excedente del consumidor | 51 |
| | |
| 3 Modelos para el pronóstico de la demanda del transporte | 53 |
| | |
| 3.1 Modelos de tendencia | 54 |
| 3.1.1 Tendencia lineal | 54 |
| 3.1.2 Tendencia geométrica | 55 |
| 3.1.3 Tendencia exponencial..... | 56 |
| 3.1.4 Tendencia exponencial modificada | 56 |
| 3.1.5 Curva de Goempertz | 57 |
| 3.1.6 Curva logística..... | 57 |
| 3.2 Regresión múltiple..... | 58 |
| 3.3 Programación lineal..... | 60 |
| 3.4 Simulaciones con la matriz de insumo producto | 62 |
| 3.4.1 Descripción general..... | 62 |
| 3.4.2 Expresión matemática de la matriz insumo-producto | 64 |
| 3.4.3 Deficiencias o críticas..... | 68 |
| 3.5 Un modelo de demanda de transporte ferroviario de pasajeros por medio del análisis de regresión | 69 |
| 3.5.1 Análisis de los datos..... | 69 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.5.2 | Las variables | 70 |
| 3.5.3 | Especificación del modelo | 71 |
| 3.5.4 | Las pruebas de significancia | 74 |
| 3.5.5 | Las pruebas de violación de supuestos..... | 76 |
| 3.5.6 | Interpretación económica de resultados..... | 80 |
| 4 | La movilidad y el problema del transporte..... | 85 |
| 4.1 | Estructura urbana, teorías de desarrollo urbano y sectorización..... | 85 |
| 4.1.1 | Concepto de ciudad | 85 |
| 4.1.2 | Estructura urbana..... | 87 |
| 4.2 | La movilidad regional y urbana..... | 90 |
| 4.2.1 | Conceptos preliminares..... | 90 |
| 4.2.2 | Definición de movilidad regional y urbana..... | 91 |
| 4.2.3 | Líneas de deseo..... | 91 |
| 4.2.4 | Tipos de movilidad regional y urbana | 93 |
| 4.3 | Demanda y oferta de transporte..... | 95 |
| 4.4 | Los pasajeros transportados | 97 |
| 4.5 | El “problema” del transporte | 99 |
| 4.5.1 | Síntomas del problema..... | 100 |
| 4.5.2 | Causas | 101 |
| 4.5.3 | Otros problemas..... | 102 |
| 4.6 | Problemas típicos del transporte urbano y suburbano de pasajeros..... | 104 |
| 4.6.1 | Cambio de ubicación de cierre de circuito..... | 105 |
| 4.6.2 | Cambio de ubicación de terminales | 106 |

| | |
|---|------------|
| 4.6.3 Cambio de ubicación de recorridos | 106 |
| 4.6.4 Asignación de alargamiento, acortamiento o extensión de ruta | 107 |
| 4.6.5 Proyecto de nuevas rutas..... | 107 |
| 4.6.6 Proyecto de nuevas empresas | 108 |
| 4.6.7 Asignación de vehículos a las rutas ("despacho")..... | 108 |
| 4.6.8 Asignación de espacios en terminal de transbordo (paradero) | 109 |
| 4.6.9 Asignación de estaciones o paradas a lo largo de una ruta | 109 |
| 4.6.10 Revisión del nivel de servicio en una ruta | 110 |
| 4.7 Estudios para el análisis de la demanda de transporte. Los estudios .. de origen y destino | 111 |
| 4.7.1 Objetivos | 111 |
| 4.7.2 Clasificación | 111 |
| 4.7.3 Metodología..... | 112 |
| 5 Modelos de comportamiento de los viajes | 113 |
| 5.1 Generación de viajes..... | 114 |
| 5.2 Distribución de viajes | 118 |
| 5.3 La selección modal..... | 119 |
| 5.4 La asignación de viajes | 122 |
| Bibliografía | 127 |

Índice de figuras

| | <u>Página</u> |
|---|---------------|
| 1.1 Función de demanda lineal | 4 |
| 1.2 Función de oferta lineal | 5 |
| 1.3 Equilibrio entre la oferta y la demanda | 6 |
| 1.4 Trayectoria hacia el equilibrio oferta-demanda..... | 7 |
| 1.5 Equilibrio estático entre la oferta y la demanda..... | 10 |
| 2.1 Variación horaria | 16 |
| 2.2 Variación semanal..... | 17 |
| 2.3 Variación a lo largo de la ruta..... | 17 |
| 2.4 Variación de la elasticidad..... | 25 |
| 2.5 Sensibilidad de la demanda de viajes | 26 |
| 2.6 El excedente del consumidor | 36 |
| 2.7 Áreas debajo de la curva de demanda..... | 38 |
| 2.8 Cambio en el excedente del consumidor..... | 38 |
| 3.1 Esquema del “problema de transporte” | 60 |
| 4.1 Expansión concéntrica | 87 |
| 4.2 Teoría sectorial..... | 88 |
| 4.3 Expansión multicéntrica..... | 89 |
| 4.4 Composición de un viaje | 91 |

| | |
|---|----|
| 4.5 Formación de la línea de deseo | 87 |
| 4.6 Representación de líneas de deseo | 88 |
| 4.7 Movilidad radial | 89 |
| 4.8 Movilidad tangencial | 89 |
| 4.9 Ascenso - Descenso de usuarios | 90 |
| 4.10 Polígono de carga | 90 |
| 4.11 Demanda de transporte..... | 91 |

Resumen

El objetivo central del presente trabajo es el de ofrecer, a los lectores de habla hispana, una descripción global y fundamental de los principales conocimientos que, en opinión de los autores, resulta indispensable para un adecuado tratamiento de la demanda de servicios de transporte, a partir de lo actualmente ofrece la teoría económica ya consolidada internacionalmente. En el caso de algunos conceptos sólo hemos seleccionado, traducido o interpretado el no muy abundante material especializado sobre economía de los transportes. En otros casos, hemos incluido algunas propuestas en aquellas ideas que encontramos que la literatura no ofrecía una adecuada explicación.

Específicamente, el presente trabajo tiene tres motivaciones principales. Así, nuestro primer objetivo reconoce que actualmente ya se dispone de algunas herramientas analíticas para el tratamiento serio de los diversos aspectos de la plantación, operación, diseño, y particularmente en la evaluación de los sistemas de transporte y de sus componentes. Casi todas esas herramientas contienen, explícita o implícitamente, muchos conceptos, teorías y modelos que tratan de sustentar, desde el punto de vista económico, la forma o método específico de darle tratamiento al problema o tópicos en estudio. Sin embargo, quienes usan dichas herramientas no siempre están conscientes de los conocimientos que están usando y de sus implicaciones teóricas y metodológicas. Por ejemplo, muchos modelos de optimización o de simulación de redes de transporte asumen la existencia de rendimientos constantes a escala. El significado real y los alcances reales del modelo quedan así fuertemente condicionados a este supuesto, el cual, muy probablemente, no se presente en la gran mayoría de los casos reales. ¿Cuanto puede afectar la aplicación indebida de un modelo con un supuesto que no se cumple? Eso depende de las características del caso que se esté analizando. Sin embargo, es obligación de quien analiza o usa las herramientas analíticas mencionadas el estar consciente del uso de dicho supuesto. En la experiencia de quienes estamos produciendo el presente trabajo, no encontramos que sea muy frecuente esta situación.

La segunda motivación también está muy relacionada con la falta de difusión de los conocimientos básicos que a partir de los conceptos económicos se cuenta ya para el tratamiento de la demanda de transporte. Realmente, los autores creemos que es la falta de difusión lo que provoca que no se apliquen los conocimientos disponibles y no la complejidad de los mismos, que ciertamente no es muy grande. Cualquier persona con una formación profesional razonablemente sólida en matemáticas básicas puede aplicar los conceptos expuestos en el presente trabajo. Por ejemplo, los conceptos de elasticidad de la demanda no solo tendrían mucha más aplicación de lo que observamos hoy en día en los transportes, sino también habrían provocado la generación y uso de otras herramientas analíticas así como datos y estudios de aplicación más amplia y compleja.

Finalmente, este trabajo pretende ser un primer documento que sirva como base para estudios de caso, compilaciones o trabajos analíticos específicos. Así, más que profundizar, se ha tratado de dar una visión global o completa de las principales herramientas analíticas microeconómicas (y, en menor medida, macroeconómicas) que podrían ser de utilidad para conocer la demanda de transporte. De hecho, los autores tenemos el propósito de abordar otros temas relacionados con los expuestos en las presentes páginas o profundizar en ciertos tópicos enfatizando los elementos metodológicos y de aplicación. Por supuesto, es tan grande el campo de aplicación y es tan diversa la tipología de problemas de transporte que los autores reconocemos que el presente es apenas un primer paso en lo que deberá ser una verdadera colección de documentos sobre economía de los transportes.

Abstract

The main objective of the current work is to give to the Mexican planners or decision makers a first but complete and global vision of the analytical tools that contemporary microeconomics or, to some extent, macroeconomics could offer to us in order to have an adequate treatment of transport demand.

First chapter introduces to the microeconomic basic concepts of transport demand and transport supply, and their corresponding interactions and equilibrium. Then, second chapter contains a broad description of the main concepts or basic analytical tools of transport demand, such as, elasticity, demand variation, consumer surplus, etc.

Third chapter concentrates on the analysis of the most currently used models for transport demand forecasting, with special emphasis on the econometric tools, their limitations and real possibilities.

The chapter four changes in the approach, focusing on the mobility as the variable that really explains the origin of the transport demand: the needs of population to travel given the urban or regional structure and their economic and social activities.

Finally, chapter five, introduces to the most complete set of transport demand models: the “four steps” or “behavioral” models commonly applied to transport analytical planning.

Resumen ejecutivo

Los elementos y conceptos presentados tienen como objetivo mostrar las distintas aplicaciones de los principios económicos a un bien, el cual se caracteriza por una distribución espacial, y el no poder ser almacenable, esto es, el transporte.

Una parte fundamental del trabajo son los ejercicios de aplicación, los cuales complementan la base teórica de cada uno de los aspectos económicos. Las aplicaciones abarcan tanto el ámbito empresarial (micro) como el nacional (Macro).

Se llevó a cabo un análisis de la demanda del transporte a partir de los factores que la afectan de manera directa e indirecta. En el análisis destaca el hecho de que es considerada como una demanda derivada, o sea que el transporte es un servicio raramente demandado por sus propias características porque usualmente se deriva de alguna otra función o necesidad. Por ejemplo, la demanda de un producto en determinado lugar originará la necesidad de desplazarlo desde los centros de producción a los centros de consumo, por lo que de su demanda dependerá la demanda de transporte.

Dentro de las aplicaciones prácticas destaca el concepto de la elasticidad de la demanda, la cual mide la respuesta de la demanda de un servicio de transporte ante el cambio en sus factores determinantes (tarifa, ingreso, nivel de servicio, etc.).

Asimismo, la oferta de los servicios de transporte se analiza en función de los factores que la determinan. Dentro de este tema, se señala el hecho de que la cantidad de servicios de transporte a ofrecer no sólo dependerá del precio o tarifa vigente en el mercado, sino también de factores tales como el precio de los insumos y de la tecnología.

Se establecieron las diferencias y las condiciones necesarias para maximizar los beneficios tanto en el caso de la empresa bajo el régimen de competencia perfecta, como en el caso de un régimen monopolístico.

En relación con las políticas de precios, se ilustra cómo la discriminación de precios juega un papel importante en la maximización del ingreso de los operadores de los servicios de transporte. Esto se logra al mostrar que cuando una empresa discrimina entre diferentes grupos de clientes, cobrando a cada uno un precio diferente para unidades idénticas de oferta, la empresa convertirá el excedente del consumidor en parte de su excedente, en forma de mayores ingresos.

También se analiza el papel del Estado en las decisiones de los usuarios y de los productores de servicios de transporte, aunque con una visión muy restringida a las herramientas de análisis económico. Dentro de los temas de mayor interés en este apartado destacan los mecanismos de regulación para incentivar la competencia, ventajas derivadas de las economías de escala, privatización, etc., con el único fin de proteger el bienestar de la comunidad.

En forma sintética, el presente trabajo esta estructurado de la forma siguiente.

En el primer capítulo se introduce al lector a los conceptos microeconómicos básicos relacionados con la oferta y demanda de transporte, así como sus correspondientes interacciones y el eventual equilibrio del mercado de servicios de transporte. Con ello como base, el segundo capítulo contiene una descripción de los principales conceptos o herramientas analíticas de la demanda de transporte, tales como factores condicionantes de la demanda, elasticidad, variación de la demanda, excedente del consumidor, etc.

El tercer capítulo se concentra en el análisis de los modelos mas frecuentemente usados para el pronóstico de la demanda de transporte, con especial énfasis en las herramientas econométricas, sus principales limitaciones y sus posibilidades reales de aplicación.

El capítulo cuatro cambia el enfoque, enfocando a la movilidad como la variable que realmente explica el origen de la demanda de transporte: las necesidades que tiene la población para viajar o hacer envíos dada, cierta estructura urbana o regional y sus correspondientes actividades económicas y sociales.

Finalmente, el capítulo cinco introduce al lector al más completo conjunto de modelos de la demanda de transporte que se ha desarrollado hasta la actualidad: los modelos de las cuatro fases o modelos de comportamiento de los viajes, que son cada vez mas aplicados para la planificación analítica del transporte.

1 Introducción al análisis oferta-demanda en el transporte

Diariamente la sociedad debe enfrentar y resolver tres problemas básicos de la economía: qué bienes y servicios producir, cómo producirlos y, por último, para quién producirlos.

Por supuesto, para producir los bienes y servicios que requiere la sociedad, es necesario contar con recursos, los cuales prácticamente son escasos. Estos pueden ser de tipo natural (agua, petróleo, tierra, flora y fauna, etc.); humano (trabajo); y capital (maquinaria, equipo, etc.). Por ello, para el estudio y solución de estos problemas la sociedad se apoya en la parte de las ciencias sociales que trata y explica el comportamiento humano en la toma de decisiones que resolverán tales problemas, la Economía. Dicha solución se traducirá en una asignación de recursos, es decir, en una forma en que la sociedad distribuye los recursos entre los diferentes agentes económicos que integran a la sociedad (consumidores, productores y gobierno).

Los conceptos que se presentan en el presente trabajo tienen como objetivo mostrar las distintas aplicaciones de los principios económicos a un servicio que se caracteriza por una distribución espacial y no poderse almacenar, esto es, el transporte. En la medida de lo posible, se han incluido algunos ejercicios de aplicación que se pretende que complementen la base teórica de cada uno de los aspectos económicos a lo largo de cada capítulo. Las aplicaciones abarcan tanto el ámbito empresarial (micro) como el nacional (macro). En otras palabras, el presente trabajo ha intentado cubrir tanto los aspectos del estudio de la microeconomía aplicada al transporte, como los referentes a la macroeconomía, aunque con menos énfasis.

Se entiende por Microeconomía la parte de la Economía que se encarga del "estudio del comportamiento económico de parte (s) de un sistema económico, especialmente el de un pequeño grupo de consumidores o de empresas".¹ Es decir, la microeconomía analiza de manera detallada el comportamiento y las decisiones individuales en relación con un determinado tipo de bienes o servicios. Debido a este análisis detallado que lleva a cabo la microeconomía es necesario estudiar de manera simplificada el análisis de tales situaciones; por ello, la microeconomía ignora o simplifica las interacciones con el resto de la economía. Tales interacciones serán objeto de estudio de la Macroeconomía, tratada básicamente en los últimos capítulos con su aplicación respectiva al sector transporte nacional.

Debido a la complejidad de las relaciones individuales entre los diversos agentes económicos, la economía se apoya en modelos y teorías con la finalidad de

¹ Rutherford Donald. Routledge Dictionary of Economics. 2ª Ed 1995

simplificar la realidad. Dichos modelos y teorías se fundamentan a través de supuestos acerca de cómo los agentes económicos se comportan. Sin embargo, para desarrollar modelos será necesario contar con datos o eventos que ayuden a encontrar relaciones que expliquen los fenómenos derivados de las relaciones entre tales agentes económicos (por ejemplo, estadísticas). En este trabajo, el análisis del comportamiento y las decisiones individuales por parte de los agentes económicos se centrará en la determinación óptima de recursos para generar el servicio de transporte.

1.1 El mercado

"Mercado es una expresión utilizada para describir el proceso mediante el cual las decisiones de individuos acerca de qué bienes o servicios consumir, las decisiones de empresas acerca de qué, cómo y cuánto producir, y las decisiones de trabajadores acerca de cuánto y para quién trabajar, son reconciliadas mediante el ajuste de precios y salarios"².

En el presente trabajo, el mercado estará integrado básicamente por tres agentes económicos. El primero se representa por la empresa prestadora de servicios de transporte, ya sea de pasajeros y/o carga, a la que se denominará operador de servicios de transporte. Tales empresas tendrán como finalidad el traslado en el espacio de personas y/o cosas en un ámbito geográfico (urbano, suburbano, interurbano, rural, e internacional), a través de un medio físico (terrestre, aéreo, acuático), y utilizando un modo de transporte determinado (autotransporte, ferrocarril, aviación comercial, navegación de altura, etc.).³ El segundo agente económico está compuesto por los consumidores, los cuales se representan por los usuarios de los distintos servicios ofrecidos por los operadores de transporte. Finalmente, el mercado estará integrado por un tercer agente económico, el Estado, el cual intervendrá de manera directa e indirecta en la toma de decisiones tanto de los usuarios como de los operadores de los servicios de transporte.

1.2 La demanda y oferta del transporte

Estos son los dos lados de un mismo fenómeno que hemos reconocido como "mercado" de servicios de transporte. Podría pensarse que, en consecuencia, su análisis se ha desarrollado en forma muy paralela. Sin embargo, como veremos en estas mismas páginas, esta afirmación no es correcta. No obstante, en los siguientes apartados del capítulo describiremos los modelos básicos primero de la demanda de transporte, después lo correspondiente a la oferta y después un modelo que intenta integrarlos en una sola representación (su "equilibrio") que resalta su interacción en un mismo fenómeno económico.

² Begg D, Fischer S. y Dornbusch R. Economics. McGraw-Hill Book Company Europe. 5ª Ed, 1997

³ Islas Rivera Víctor M. Apuntes de Introducción a la Ingeniería del Transporte. UPIICSA, IPN, 1992

1.2.1 La demanda

Una función de demanda para un producto o servicio en particular, representa el deseo de los consumidores o usuarios, para comprar el producto o servicio a precios alternos.

La demanda de bienes y servicios en general, dependerá en buena medida del ingreso de los consumidores y del precio de un producto o servicio en particular, relativo a otros precios. Por ejemplo, la demanda de viajes dependerá del ingreso del viajero, mientras que la selección del modo de transporte queda sujeta a una serie de factores tales como el propósito del viaje, distancia por recorrer e ingreso del viajero⁴.

En el caso del transporte una función de demanda muestra, por ejemplo, un número de pasajeros deseando utilizar un servicio de autobuses a los diferentes niveles de precios o tarifas entre un par origen y destino, para un viaje específico durante un periodo determinado. Cuando el precio de un bien o servicio aumenta, manteniendo constantes otras condiciones o factores ("ceteris paribus") como: gustos, utilidad del bien, ingreso y riqueza, los precios de bienes relacionados y de la cantidad de consumidores o usuarios potenciales, la cantidad demandada decaerá; a este fenómeno se conoce como: "Ley de la demanda".

Es posible representar gráficamente la demanda de un determinado bien o servicio, mediante una curva de demanda, la cual grafica la relación entre el precio de un bien y la cantidad demandada en el mercado; una función lineal de demanda de viajes se muestra en la figura 1.1 para un par de puntos (origen y destino), un tiempo específico en el día, y para un propósito en particular. Es decir, una curva de demanda es la representación gráfica de la función de demanda, para predecir los viajes sobre un amplio rango de condiciones. Esta función asume un nivel y distribución dados del ingreso, de la población, y de las características socioeconómicas de la misma.

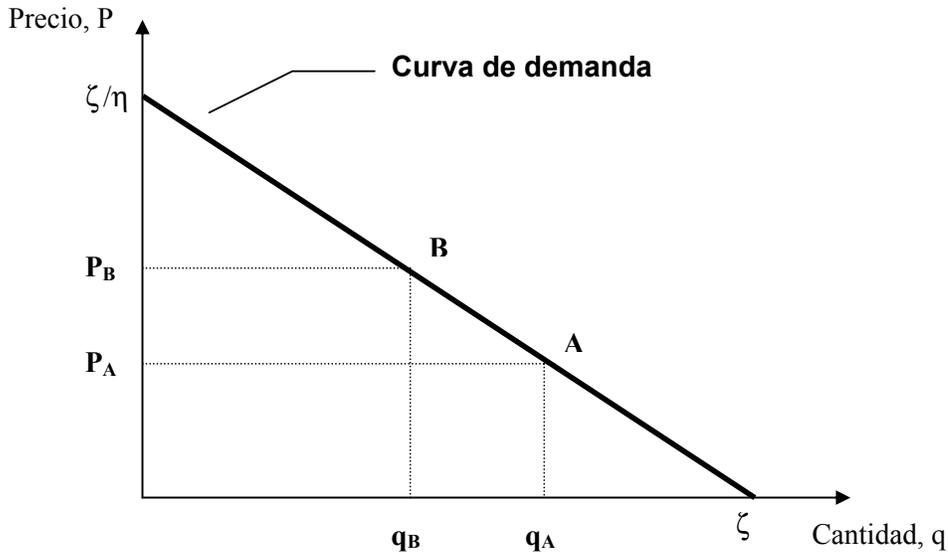
La función de demanda lineal de la figura 1.1, puede expresarse como sigue:

$$Q(p) = a - bp \quad \text{-- (1.1)}$$

Donde Q es la cantidad demandada del producto o servicio, p es el precio del producto o servicio, y a y b los parámetros constantes. Como puede observarse, la función de demanda se dibuja con pendiente negativa, expresando una situación donde un decremento en el precio percibido resultaría en un incremento en los viajes, aunque esto no siempre es cierto.

⁴ Stubbs, PC, y Tyson, WJ, Transport Economics, Ed. George Allen & Unwin, 1984, U.K.

Figura 1.1
Función de demanda lineal



Para el caso de los servicios de transporte, la demanda se considera como una demanda derivada. Esto es, el transporte es un servicio raramente demandado por sus propias características ya que usualmente se deriva de alguna otra función o necesidad; por ejemplo, la demanda de un producto en determinado lugar originará la necesidad de transportar el producto desde los centros de origen hacia los centros de consumo, de ahí que el volumen de demanda producirá a su vez una demanda de transporte.

1.2.2 La oferta

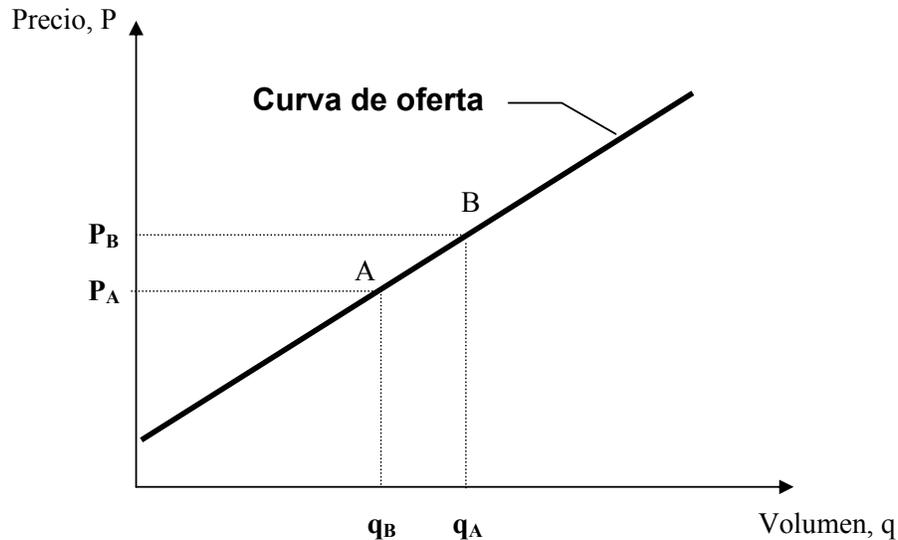
La función de oferta representa la cantidad de bienes o servicios que un productor desea ofrecer a un precio determinado. Así, para el caso de una empresa que ofrece un servicio de transporte de pasajeros, la función de servicio estará dada por la cantidad de autobuses-kilómetro ofrecidos a determinada tarifa. Sin embargo, la cantidad de producto a ofrecer no sólo dependerá del precio del producto en el mercado, sino también de factores tales como el precio de los insumos y de la tecnología.

Cuando el precio de un bien aumenta, manteniendo constantes otras condiciones ("ceteris paribus"), como: precio de los insumos, tecnología disponible, cantidad de productores potenciales, etc., la cantidad ofrecida aumentará. Este fenómeno se conoce como: "Ley de la oferta".

De manera similar a la demanda de transporte, es factible representar gráficamente la oferta de determinado bien o servicio a través de una curva de

oferta, la cual muestra la relación entre el precio de un bien o servicio y la cantidad ofrecida en el mercado. Una función lineal de oferta de transporte corresponde a la figura 1.2.

Figura 1.2
Función de oferta lineal



La función de oferta lineal de la figura 1.2, puede expresarse como sigue:

$$O(p) = c + d p \quad \text{--(1.2)}$$

Donde O es la cantidad ofrecida del bien o servicio, y c y d son parámetros constantes. Como puede observarse, en la figura 1.2, la función de oferta tiene una pendiente positiva al expresar una relación positiva entre el precio y la cantidad ofrecida.

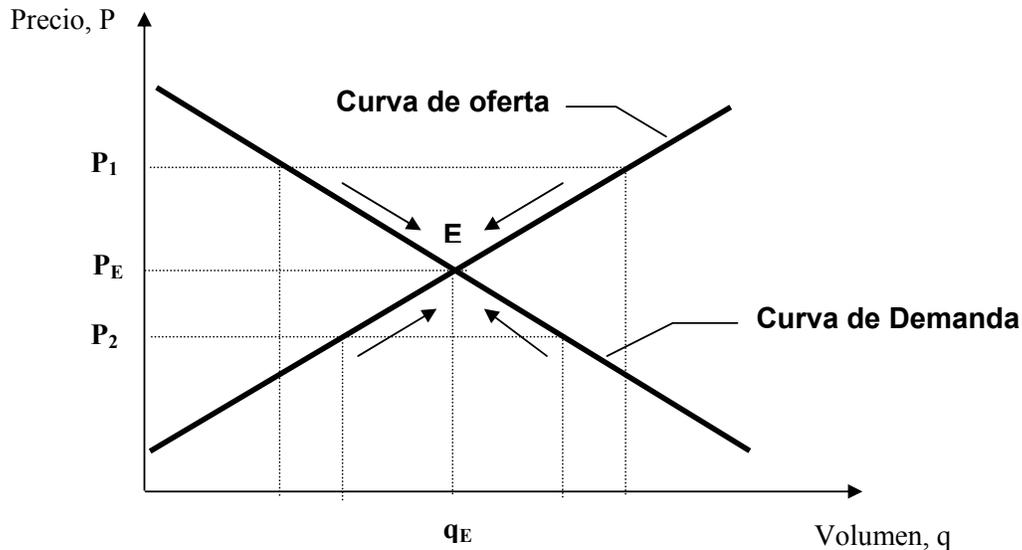
1.3 Equilibrio en el mercado

Equilibrio es un estado de balance tal que un conjunto seleccionado de variables interrelacionadas no tienen una tendencia inherente a cambiar⁵. Así, desde el punto de vista económico, el equilibrio de mercado es una situación en la cual la cantidad ofrecida es igual a la cantidad demandada. Esto ocurre cuando las curvas de demanda y de oferta se interceptan, como se muestra en la figura 1.3,

⁵ Rutherford Donald. Routledge Dictionary of Economics. Ed. Routledge, 1995.

donde E es el equilibrio, P_E es el precio de equilibrio, y q_E es la cantidad de equilibrio.

Figura 1.3
Equilibrio entre la oferta y la demanda

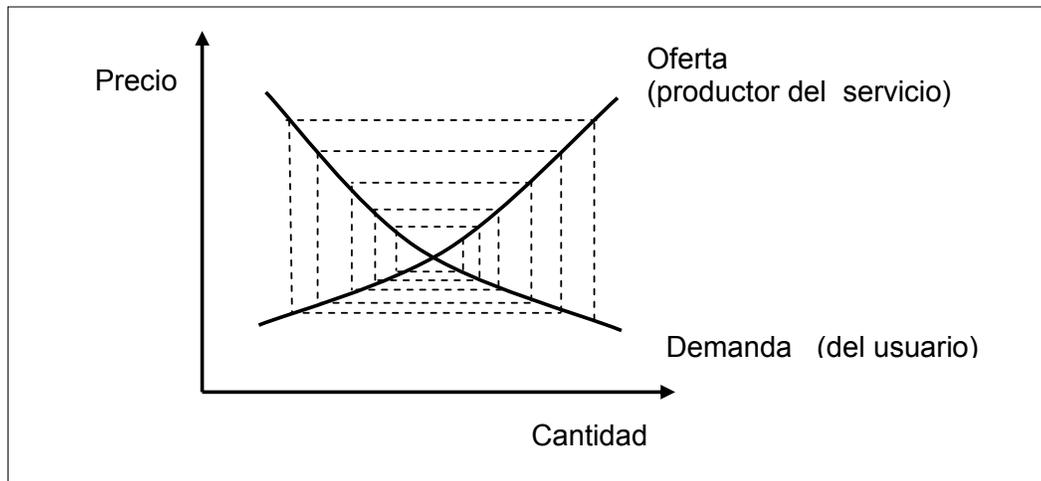


Como se observa en la figura 1.3, a un precio por debajo del de equilibrio, ocurrirá un exceso de demanda y el precio tenderá a elevarse. Por el contrario, a un precio por encima del de equilibrio, se presentará un exceso de oferta, y el precio tenderá a bajar.

Lo anterior implica que el equilibrio se alcanza siempre, a partir de cualquier punto fuera del equilibrio, siempre que se dejen actuar libremente las fuerzas del mercado, esto es, a las “leyes de la oferta y demanda” (véase la figura 1.4). Esto se conoce también como Teorema de la Telaraña, que representa un análisis de corte transversal, y sirve para llevar a cabo un análisis de estática comparativa, asumiendo un equilibrio parcial (en el sector analizado) sin consecuencias directas para otros sectores (lo que estudia la Teoría del Equilibrio General).⁶

⁶ Islas Rivera Víctor M. Apuntes de Economía del Transporte. UPIICSA, IPN, 1992.

Figura 1.4
Trayectoria hacia el equilibrio oferta-demanda



Por tanto, se puede decir que el estudio del equilibrio consiste en analizar cómo los precios se ajustan de tal forma que las decisiones de los agentes económicos de la cantidad de demanda y de oferta sean compatibles. Asimismo, si las funciones de demanda y de oferta para un sistema de transporte son conocidas, entonces es posible tratar el concepto de equilibrio.

Si se tiene un equilibrio en el mercado, es posible analizar el efecto de cambios en otros factores tanto en la demanda como en la oferta, que llevarán a un nuevo equilibrio, es decir, se estudia el efecto de la relajación del supuesto de que otros factores que permanecen constantes "ceteris paribus". En el caso de la demanda, tales factores pueden agruparse básicamente en tres grupos: los gustos o preferencias de los consumidores, el ingreso de los consumidores, y los precios de bienes relacionados.

En el caso de la oferta, los factores pueden agruparse en las siguientes categorías: la tecnología disponible de los productores, el costo de los insumos (trabajo, maquinaria, materias primas, etc.), y la regulación del Gobierno⁷. De lo anterior se infiere lo siguiente: cualquier factor que induzca un incremento en la demanda producirá un desplazamiento de la curva de demanda a la derecha, aumentando el precio y la cantidad de equilibrio. Por otra parte, un decremento en la demanda (desplazamiento a la izquierda de la curva de demanda) reducirá el precio y la cantidad de equilibrio.

Cualquier factor que induzca un incremento en la oferta producirá un desplazamiento de la curva de oferta a la derecha, aumentando la cantidad de

⁷ Begg D, Fischer S, y Dornbusch R. Economics. McGraw-Hill Book Company Europe. 5ª Ed, 1997.

equilibrio pero reduciendo el precio de equilibrio. Por otra parte, disminuciones en la oferta (desplazamiento a la izquierda de la curva de oferta) reducirán la cantidad de equilibrio, pero subirá el precio de equilibrio.

El análisis anterior es conocido como Análisis de Estática Comparativa, el cual es una técnica de análisis económico que consiste en comparar una posición de equilibrio con un equilibrio posterior, que ha surgido como resultado de cambios en los valores de los parámetros y en las variables exógenas.

1.4 Unidades de la oferta y demanda de transporte

¿En qué unidades se mide la demanda y, consecuentemente, la oferta de transporte? Existen varias unidades, no siempre claramente identificadas.

- 4 VIAJE. Esta es una forma fácil y práctica de medir los deseos de movimiento de las personas y sus bienes. Sin embargo, no resulta fácil asociarla con la oferta.
- 4 PASAJEROS. Por el contrario, para la empresa de transporte es más fácil hablar de pasajeros como la demanda que enfrenta y que tiene que satisfacer con oferta de espacio para esos pasajeros. El problema de lo anterior radica en que los viajes largos son igualmente valorados que los viajes cortos.
- 4 PASAJEROS KILÓMETRO (pax-km). Para corregir el defecto anterior, una medida consiste en multiplicar los viajes por la distancia que implican para llegar así al concepto de pasajeros kilómetro; por ejemplo, 10 pasajeros demandando viajes de 1.5 km (15 pax-km) requieren más oferta que esos mismos 10 pasajeros, demandando sólo 1 km en sus viajes (10 pax-km).
- 4 PASAJEROS KILÓMETRO POR UNIDAD DE TIEMPO. (pax-km/tiempo). En ocasiones, resulta necesario conocer la frecuencia con que se presenta la demanda en relación al tiempo; por ejemplo, es muy importante saber si los 10 pax-km demandados se presentan en una hora o en media hora.
- 4 VEHÍCULO. En otras ocasiones, la demanda de transporte se hace por un vehículo y no por cada usuario. Así, si se contrata el vehículo para un viaje, o para un período de tiempo; también pueden construirse las unidades veh-km o veh-hora, o incluso la más elaborada de veh-km/hora.
- 4 CARGA. Similarmente al caso de las personas, en lugar de viajes o envíos, se puede ser más preciso para identificar el esfuerzo que se requiere y tener unidades como son: toneladas, ton-Km, ton-km/tiempo, etc.

1.5 Ejemplo de aplicación: equilibrio entre la demanda y la oferta de transporte

Se ha observado que el tiempo de viaje en una carretera de un carril por sentido, la cual conecta dos localidades con actividad económica importante, se comporta de acuerdo con la siguiente ecuación o función de servicio:

$$t | 25.2 - 0.008v \quad (1.3)$$

Donde: t y v son el tiempo y el volumen vehicular expresados en minutos y número de vehículos, respectivamente.

La función de demanda de viajes que se realizan entre los dos centros de actividad (localidades) es:

$$v | 5500 - 4110t \quad (1.4)$$

Grafique tanto la función de servicio como la ecuación de demanda, y determine el tiempo y velocidad de equilibrio de viaje.

SOLUCIÓN

Recordando que:

$$t | 25.2 - 0.008v$$

$$v | 5500 - 4110t$$

Sustituyendo (1.3) en (1.4):

$$v | 5500 - 4110(25.2 - 0.008v)$$

$$v | 5500 - 10377 + 32.88v$$

$$v - 32.88v | -4877$$

$$v(-31.88) | -4877$$

$$v \mid \frac{2750}{1.88} \mid 1462.76$$

Por tanto: volumen vehicular de equilibrio = $v = 1463 \text{ veh/h}$ (1.5)

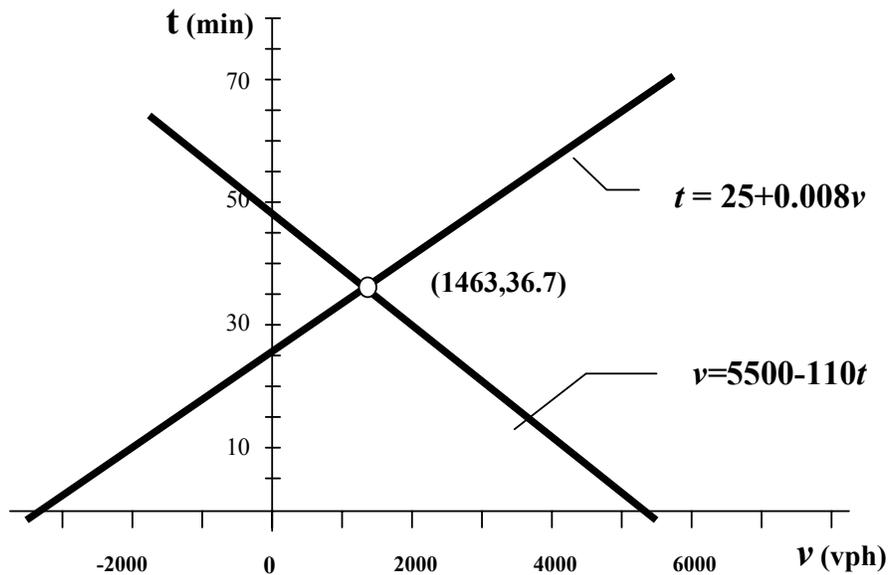
Sustituyendo (1.5) en (1.3):

$$t \mid 25 + 0.008(1463)$$

Por tanto: tiempo de equilibrio = $t = 36.7 \text{ min}$

Esta solución queda representada como se puede ver en la figura 1.5.

Figura 1.5
Equilibrio estático entre la oferta y la demanda



2 La demanda de transporte: características económicas

De acuerdo con la corriente prevaleciente en la teoría económica, el viajero es visto como un consumidor que en realidad está seleccionando entre varias opciones para maximizar su utilidad. Es decir, escoge aquel paquete de bienes, servicios y viajes que él considera como el mejor entre todos los disponibles, teniendo en mente que varias restricciones podrían ser impuestas a su elección. Primero, estas restricciones incluyen las cantidades límite de tiempo y de dinero del viajero. Segundo, el viaje mismo impone restricciones sobre la elección del viajero de cuánto tiempo gastará viajando, ya que el tomar parte en una actividad en un destino en particular involucra que el viajero gaste una cierta cantidad de tiempo mínima en viajar: éste no puede decidir en gastar menos⁸.

2.1 Análisis de la demanda de transporte

En esta sección se analiza con cierto detalle la demanda de transporte, la cual modela el comportamiento de los usuarios al representar la cantidad de un servicio de transporte que los usuarios desean adquirir en cada nivel de precio o tarifa. En este sentido, el precio de los servicios ofrecidos y el ingreso del consumidor serán determinantes para que el consumidor sea capaz de adquirirlos; una vez que el elemento de poder de compra es decidido, el consumidor observa las características del servicio y el valor por su dinero.

De lo anterior se deduce que la función de demanda de transporte expresa la cantidad de viajes demandados durante un determinado periodo en términos de un conjunto de variables explicativas. Por ejemplo, cuando se considera la demanda de transporte público, estas variables incluyen el costo monetario del viaje, el tiempo gastado en viajar (quizá dividido en varios componentes tales como el tiempo en espera, en caminar y el tiempo a bordo del vehículo), similares variables para los modos competitivos y el ingreso⁸.

Como se señaló en el capítulo anterior, el transporte es un servicio raramente demandado por sus propias características ya que, por ejemplo, una compañía que produce ropa o alimentos comúnmente ve al transporte sólo como un medio para mover sus productos desde la fábrica o almacén hacia los centros de venta. Conforme la demanda de productos se incrementa, en esa misma medida se incrementarán los servicios, instalaciones e infraestructura del transporte.

⁸ Transport and Road Research Laboratory TRRL. The Demand for Public Transport. Report of the International Collaborative Study of the Factors Affecting Public Transport Patronage. 1980.

Cabe señalar que existe un supuesto muy importante en el análisis de la demanda de transporte, y que consiste en asumir que la demanda del mercado será el agregado de todas las demandas de los consumidores, y ésta será a su vez determinada por los mismos factores que afectan las demandas individuales. Esta es una premisa que debe ser revisada al obtener conclusiones generales al realizar un estudio específico, puesto que deberá tenerse cuidado en las implicaciones que tendría en cada caso el que no se cumpliera este supuesto simplificadorio.

2.1.1 Factores que determinan la demanda de transporte

Las razones por las que la demanda será más o menos intensa en unas regiones o lugares, o en unos momentos más que en otros, son muy diversas. Sin embargo, frecuentemente destacan ciertos factores. Por ello, autores como Stuart Cole (⁹), afirman que los factores a considerar en la determinación de la demanda de servicio transporte son, principalmente, los siguientes.

a. Características físicas (servicios de transporte de carga)

En el transporte de carga, la selección del modo de transporte dependerá mayormente de las características de los productos a mover.

- Productos de alto valor y bajo volumen, son movidos usualmente por transporte aéreo
- Productos de bajo valor y grandes volúmenes son movidos por barco, carretera o ferrocarril

b. El precio

Normalmente, el precio del servicio está inversamente relacionado con la cantidad demanda de viajes. Es decir, a menor precio, mayor cantidad de usuarios demandará el servicio de transporte ofrecido. Recíprocamente, un aumento del nivel de precio del transporte ("tarifa") reducirá la cantidad de usuarios demandando dicho servicio, puesto que existe un nivel máximo de pago que cada usuario está dispuesto a realizar.

9 Stuart Cole. *Applied Transport Economics. Policy, Management and Decision Making*. Editorial Kogan Page Limited, 1998.

En el caso del transporte de carga, el nivel de los costos de transporte también será un elemento en la localización de las fábricas y demás centros de trabajo. Si los costos de transporte son bajos comparados con otros costos, una compañía podrá tomar ventaja de menores costos del suelo alejándose de los grandes mercados urbanos. Así, más toneladas-kilómetro serán operadas. Lo anterior se reflejará directamente en el precio del producto.

c. Los precios relativos de los diferentes modos de transporte o de servicios de transporte similares

La transferencia de pasaje entre los diferentes modos o compañías en el transporte de pasajeros se determina en gran parte por los niveles relativos de tarifas del ferrocarril, autobús y servicios aéreos, así como del costo percibido por viajar en automóvil (por ejemplo, precios de la gasolina, tarifas de estacionamiento, etcétera).

En el transporte de carga, los efectos de los diferentes precios son más difíciles de analizar, ya que los acuerdos sobre el precio y la calidad del servicio son, en la mayoría de los casos, confidenciales entre el transportista y el cliente.

De hecho, también los niveles de precio y disponibilidad de los bienes y servicios sustitutos del propio servicio de transporte de pasajeros, como el caso de las telecomunicaciones, puede llegar a afectar su demanda.

d. Ingreso del pasajero

En términos generales, si el ingreso de los habitantes de una cierta región se incrementa de manera evidente y no ocasional, la demanda de transporte aumentará (ya sea en cantidad de viajes, o cantidad de kilómetros), pues al tener más ingresos hay más posibilidades de comprar vehículos o realizar más viajes en el transporte público. En realidad, en muchas ocasiones es el nivel socioeconómico del usuario (siempre que sea estable o sea el observado en promedio en un lapso amplio) lo que determina que tenga mayor actividad económica y social, además de más compromisos ineludibles. Lo mismo puede decirse de toda la región, esto es, del conjunto de usuarios: al incrementarse de manera estable el nivel promedio de ingresos de la población, mayor necesidades de traslado habría de esperar porque la mayor disponibilidad de recursos estaría asociada con una también mayor actividad económica y social, en general.

e. Velocidad del servicio

Depende del valor del tiempo de los usuarios del servicio de transporte. Un menor tiempo requerido para realizar el servicio de traslado incentivará un mayor uso por los usuarios. Además, una mayor productividad mejorará la disponibilidad de los vehículos para satisfacer el incremento de la demanda sin la necesidad de adquirir vehículos adicionales.

f. Calidad del servicio

En muchas ocasiones no es el precio (algo esencialmente cuantitativo) sino la calidad del servicio (evidentemente, con un fuerte componente subjetivo) que en general esté ofreciendo la empresa prestataria, lo que motiva que se acerquen más usuarios a solicitar su servicio. Los elementos que pueden entrar en consideración del usuario pueden ser muy variados. Entre los más usuales destacan los siguientes.

- i) Frecuencia del servicio.** Los tiempos de despacho o los tiempos de arribo deben ser aquellos que el cliente espera obtener. Además, debe tomarse en cuenta que, en las situaciones en que no se puede programar la oferta con la demanda de transporte, el tiempo de espera de un usuario es, en promedio, igual a la mitad del intervalo de paso que se mantenga entre dos servicios consecutivos. Así, si el servicio es poco frecuente y no se conoce con anticipación el horario de paso, los usuarios pueden esperar demasiado.

- ii) Estándar del servicio.** La calidad de un servicio se determina por el mantenimiento de ciertos estándares o normas de desempeño que, como meta mínima, serán fijados en función del tipo de servicio (primera clase, segunda clase, etcétera). De hecho, dichos estándares deben ser acordes con el nivel de vida de la mayoría, lo cual debe ser tomado en cuenta por los transportistas si realmente desean continuar con la atracción de demanda por sus servicios.

- iii) Comodidad.** Esto se refiere no sólo a los aspectos que frecuentemente se relacionan con el “confort” propiamente del viaje o del vehículo, tales como viajar sentado y con cierta amplitud, visibilidad, aire respirable, temperatura regulada, ascenso y descenso fácil, etcétera, sino con aspectos relacionados con el diseño de las rutas o de las instalaciones para la espera y acceso a los vehículos todo lo cual se traduce en un ahorro de esfuerzos y molestias para los usuarios.

iv) Confiabilidad. Una razón frecuente de la pérdida de usuarios tanto en el transporte de carga como en el de pasajeros, es cuando se falla al entregar los productos a tiempo, o para llevar a los pasajeros a sus destinos, o al no realizar una conexión del servicio en el tiempo programado.

e) Seguridad. Este es de suma importancia en el transporte de pasajeros y concierne tanto a los pasajeros y autoridades del Gobierno como a los proveedores del servicio. La publicidad adversa de accidentes reduce la demanda para un modo de transporte en particular, especialmente en el corto plazo.

Así, la demanda es dependiente de cada uno de estos factores, y la compañía prestadora del servicio de transporte tiene continuamente que considerar el efecto de un cambio en el precio, en el ingreso, o en la calidad sobre la demanda de sus servicios.

2.1.2 La importancia del valor del tiempo en la demanda de transporte

Cada consumidor cambiará tiempo contra costo dependiendo de sus preferencias y nivel socio-económico. Si, por ejemplo, hay un usuario que va a viajar entre dos ciudades relativamente separadas y, dado su nivel de ingresos, le preocupa más el costo que el tiempo, viajará por un modo de transporte relativamente lento como el autobús o incluso el automóvil, mientras que a otros usuarios, quienes consideran el tiempo como más importante, seleccionarán el transporte aéreo para realizar sus viajes.

Asimismo, en función de la valoración del tiempo por parte de los usuarios potenciales del servicio, un operador debe ser capaz de reducir el tiempo de viaje con vehículos más rápidos, y disminuir la cantidad de paradas (por ejemplo, con servicios exprés) si el valor del tiempo de los usuarios así lo exige. Adicionalmente, los servicios exprés pueden proveer servicios adicionales, tales como baño a bordo y refrigerios, con la finalidad de eliminar la necesidad de paradas a medio camino.

2.1.3 Variación de la demanda

La demanda puede variar de manera imprevista o aleatoria; no obstante, dado que la demanda de transporte depende de las actividades económicas que tienen un alto grado de rutina y repetición, puede existir cierta tendencia a mostrar un comportamiento cíclico más o menos estable.

Por ejemplo, hay un patrón para la variación horaria durante el día, esto es, una demanda que al amanecer crece hasta alcanzar un máximo matutino (la "hora pico"), luego disminuye a medio día y vuelve a subir en la tarde, para reducirse conforme la población se retira a descansar durante la tarde y noche (véase la figura 2.1).

Similarmente, existe una variación en la demanda durante la semana (véase la figura 2.2): mientras que la demanda es normalmente baja los domingos, crece los lunes; se estabiliza los martes (de hecho el martes se toma como típico o promedio de la semana); puede bajar los miércoles o jueves; muestra picos y congestionamientos los viernes, para disminuir los sábados.

Igualmente, la demanda puede variar según el sentido del viaje que se realiza (véase la figura 2.3). Si el vehículo del transporte público se dirige hacia el centro de la ciudad, es muy probable que encuentre que la demanda se concentra en lugares diferentes, y tenga un volumen muy superior a lo que se observa en sentido contrario.

Figura 2.1
Variación horaria

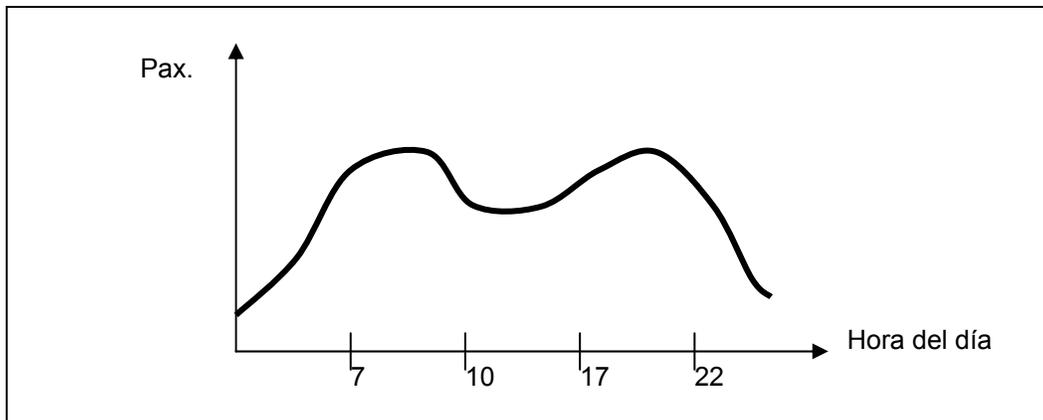


Figura 2.2
Variación semanal

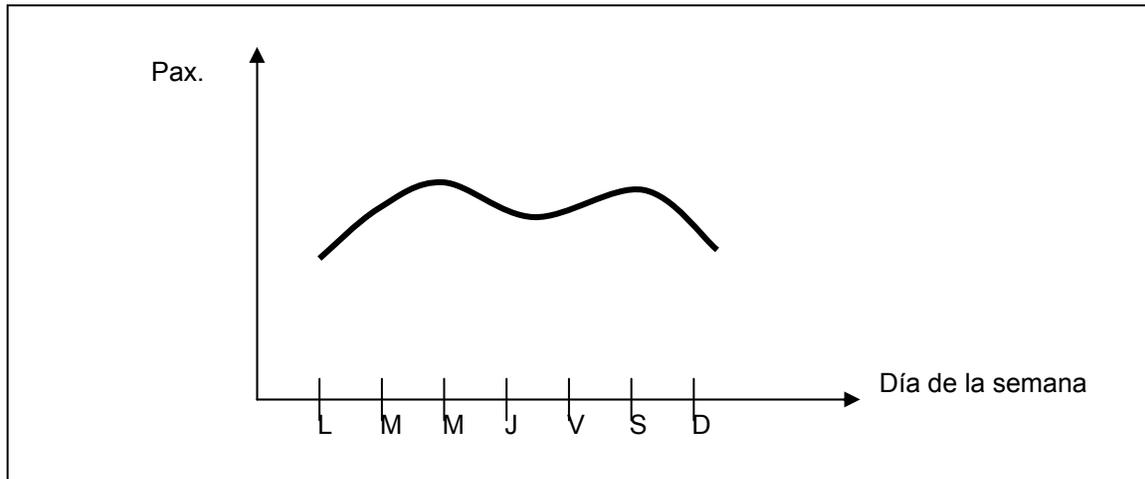
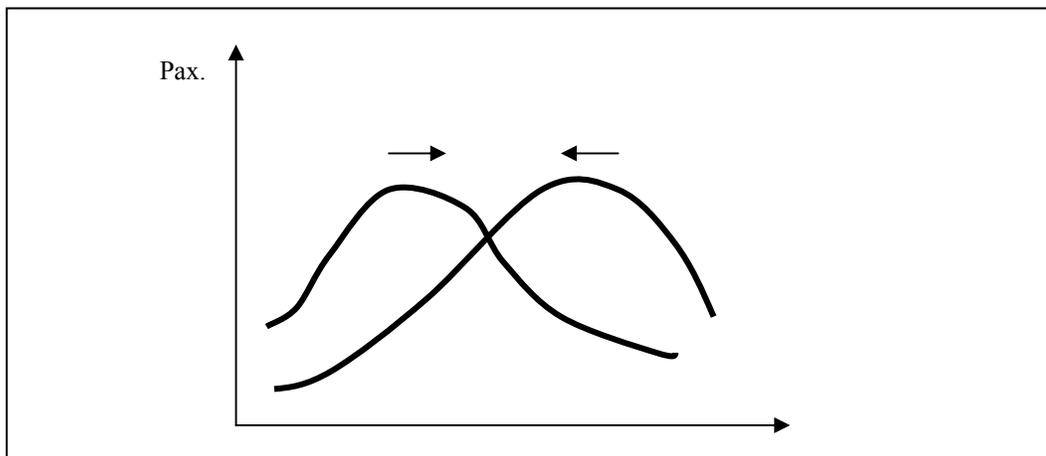


Figura 2.3
Variación a lo largo de la ruta



De lo anterior podemos concluir que si bien la demanda tiende a mostrar ciertos patrones estables, el nivel real que se presentará en un lugar y un momento específico dependerá de algunas circunstancias. Por ello, resulta necesario realizar una investigación y un monitoreo constante del comportamiento de la demanda, para sustentar mejor las decisiones que se tomen con relación a la oferta que se debe proporcionar.

Dicho estudio puede realizarse mediante dos tipos de herramientas esencialmente diferentes, pero complementarias y hasta cierto punto congruentes: el análisis microeconómico y el análisis macroeconómico. Este capítulo ha tratado de concentrarse en los primeros aspectos mientras que el tercer capítulo detallará lo relativo al análisis a nivel macro.

2.2 Patrones de demanda no influenciados por los operadores¹⁰

2.2.1 Demanda en periodos de máxima demanda

Como se detalló en la sección anterior, este fenómeno se refiere a los lapsos en los cuales la demanda de servicios de transporte se concentra de manera especialmente importante por lo que incluso puede llegar a rebasar la capacidad de transporte ofrecida. Este fenómeno puede presentarse por hora del día, día de la semana, estaciones de mayor demanda durante el año, etc.

2.2.2 Cambios en los hábitos sociales

Los cambios en el patrón de los viajes de placer están fuera del control de los operadores de transporte.

2.2.3 Cambios en los precios y calidades de servicio de los competidores

La mejora en los servicios alternos, particularmente en la reducción de precios, puede significar cambios en la demanda en los servicios de un operador en particular.

2.2.4 Cambios en la distribución de la población

El cierre o generación de nuevos centros de atracción, y generadores de viajes (centros laborales, comerciales, de vivienda, etc.) modificará el patrón de viajes de la zona en cuestión, alterando la demanda de los servicios de transporte.

Por lo anterior, se dice que básicamente el operador intenta influenciar la demanda a través de las siguientes acciones.

1. Cambios en el precio para incentivar nuevos usuarios, o atraer usuarios de otros modos o atendidos por otros operadores. El objetivo de los operadores es maximizar sus ingresos y competir más efectivamente en el mercado. En muchas áreas del transporte el problema de los picos en la demanda puede ser influenciado mediante políticas de precios.
2. Mejoramiento en la calidad del servicio en términos de: frecuencia, confiabilidad, comodidad, accesibilidad, velocidad, intervalos regulares.

¹⁰ Cole, Stuart. *Applied Transport Economics. Policy, Management and Decision Making*. Editorial Kogan Page Limited, 1998.

2.3 ¿Por qué el problema de la concentración de la demanda es particularmente malo en el transporte?

Los periodos de máxima demanda o “picos” de demanda, son lapsos en los cuales la demanda por el servicio de transporte está cercana, o rebasa la oferta de transporte que ofrece un determinado operador de servicios de transporte.

Fundamentalmente, estos periodos se presentan por la coincidencia en el tiempo y en el espacio de la demanda de servicios de transporte por parte de una gran cantidad de usuarios (por ejemplo, horas de entrada y salida al trabajo y a las escuelas).

Estos periodos, afectan significativamente las operaciones de los operadores de los servicios de transporte por las siguientes implicaciones.

1. El producto de transporte no puede ser almacenado; éste debe ser ofrecido cuando se requiere y consumido inmediatamente.
2. Puede existir una sobreoferta en los valles de demanda.
3. Costos implicados. Si por ejemplo un vehículo es usado todo el día, los costos son repartidos por el periodo de servicio (por ejemplo, 18 horas). Con un vehículo operando sólo en el Periodo de Máxima Demanda (PMD), los costos deben ser cubiertos en ese periodo, por ejemplo dos o tres viajes. Los mismos principios se aplican a los periodos máximos estacionales. Los servicios en el PMD pueden, por tanto, no ser rentables, y el precio fijado no ser suficiente para cubrir los costos adicionales. Desde el punto de vista marginal, las operaciones en los periodos fuera del PMD suelen ser más rentables, aunque la demanda en términos de pasajeros kilómetro por vehículo sea menor.
4. Indivisibilidad de la oferta. Esto se refiere al problema de vehículos que van llenos en la mañana con dirección hacia el centro, pero van casi vacíos en la dirección contraria.

2.4 La elasticidad de la demanda

El conocimiento de la forma funcional de la demanda de viajes puede ser utilizado para pronosticar cambios en el volumen de demanda, causados por cambios en el precio o tarifa del servicio en el corto plazo. Una herramienta que describe el grado de sensibilidad de la demanda a cambios en el precio (o algún otro factor) es la elasticidad de la demanda (¹¹). En otras palabras, este concepto intenta medir el grado de respuesta de la demanda (cantidad demandada del servicio de transporte) ante un cambio en los factores de la demanda (precio del servicio, otros precios, ingreso, calidad del servicio, etcétera).

La demanda de pasajeros por transporte público, por ejemplo, será influenciada por:

- las tarifas en relación con otros precios,
- las tarifas en relación con las tarifas de los otros operadores, y del costo de operación del automóvil,
- ingreso de los usuarios,
- nivel de desempleo,
- cantidad de automóviles por habitante,
- nivel de confiabilidad y nivel de servicio,
- imagen del servicio,
- etcétera.

Como es evidente, los principales usos de las elasticidades son de dos tipos: analíticos y de prognosis. En el primer caso, el interés primordial recae en simular e investigar el comportamiento teórico de los usuarios actuales. La prognosis, en cambio, está más interesada en predecir efectos, por ejemplo de modificaciones de precios del bien en cuestión, o de los ofrecidos por la competencia.

2.4.1 Tipos de elasticidad

Cuando se utilizan elasticidades de demanda, debe distinguirse entre aquellas que se refieren a cambios en la demanda para un modo en particular, ocasionados por cambios en las variables asociadas con ese modo (llamadas elasticidades propias), y aquellas que se refieren a cambios en la demanda para un modo en particular, ocasionados por cambios en las variables asociadas con otros modos que compiten en el mercado (llamadas elasticidades cruzadas).

¹¹ C. Jotin Khisty y B. Kent Lall. Transportation Engineering. An Introduction. Editorial Prentice Hall, 1998.

La elasticidad propia del precio es la respuesta de los consumidores a cambios en el precio del servicio; por ejemplo, la elasticidad del precio mide el cambio en la demanda de transporte público con respecto a un cambio en la tarifa del transporte público.

Por otra parte, la elasticidad cruzada del precio es una medida del efecto de un cambio en las tarifas de un operador sobre la demanda de los servicios de otro operador. Ésta puede tomar lugar entre los modos de transporte, dentro de los modos o aún en el interior de una empresa si ofrece una variedad de tarifas para un mismo viaje, pero con diferentes estándares de servicio; por ejemplo, el efecto en la demanda de transporte público debido a un cambio en los costos por el uso del automóvil, se mide por una elasticidad cruzada.

2.4.2 La medición de la elasticidad de la demanda

El tamaño del cambio en la demanda tiene que ser medido si la elasticidad se usa en las decisiones de política de precios dentro de una empresa.

2.4.2.1 Elasticidad precio de la demanda

En este apartado nos concentraremos en el cálculo de la elasticidad propia del servicio de transporte, esto es, la respuesta ante los cambios en los precios del mismo servicio, y omitiremos que se trata de elasticidad propia.

La elasticidad precio de la demanda se obtiene al dividir el cambio proporcional en la cantidad demandada, entre el cambio proporcional en el precio.

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\text{cambio proporcional en la cantidad demandada}}{\text{cambio proporcional en el precio}}$$

Matemáticamente, la elasticidad-precio es:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\left(\frac{\Delta q}{q}\right)}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right)} = \frac{\Delta q}{\Delta p} \cdot \frac{p}{q}$$

cuando $\Delta p \downarrow 0$ $\epsilon_{p_x} = \left(\frac{\partial q}{\partial p}\right) \frac{p}{q}$ (2.1)

También se puede expresar en forma más práctica como:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\left(\frac{\Delta q}{q}\right) \cdot 100}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \cdot 100} \quad (2.2)$$

Bastaría conocer el incremento en precio y cantidad, y los correspondientes niveles iniciales, para calcular la elasticidad implícita en un cambio de precio.

Nótese que la elasticidad es un concepto negativo, es decir, se asume que los incrementos en precio tienen un efecto negativo en la cantidad demandada, y que los decrementos de precio ocasionarán un aumento la demanda.

El anterior es un método para medir la elasticidad en forma directa. Al comparar dos puntos bajo la curva de demanda, la expresión 2.2 se conoce también como "elasticidad arco". Sin embargo, la gráfica del problema hace evidente que la función demanda no es siempre lineal, por lo que la aplicación de la fórmula tiene un riesgo. Por ello, resulta más aconsejable calcular la elasticidad a partir de la propia función de demanda (si es que se conoce), y aplicar los conceptos del cálculo diferencial. En otras palabras, se trataría de conocer la elasticidad a partir de datos tomados "en campo" (datos de una muestra de precios y cantidades), tratando de determinar la función demanda mediante técnicas como la regresión lineal o algún otro método de la econometría. En ese y en otras ocasiones resulta conveniente aplicar directamente logaritmos, sabiendo que:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\partial q / q}{\partial p_x / p_x} = \frac{\partial \text{Log} q}{\partial \text{Log} p_x} \quad (2.3)$$

El problema consiste en que la elasticidad, esto es la pendiente de la curva o la tasa de cambio, variará a lo largo de la curva, y la elasticidad a un nivel de tarifa dado no será igual a un nivel de tarifa abajo o por arriba de éste. Con la expresión 2.2, el cálculo de la elasticidad se supone que se estima en un punto de la curva de demanda. Sin embargo, la elasticidad punto puede resultar diferente ante grandes cambios en la tarifa. Debido a que los cambios en el mundo real en la variable explicativa (por ejemplo, tarifas) pueden ser significativos, otras medidas de elasticidad se han definido para calcular la elasticidad ante situaciones de cambios discretos y posiblemente grandes, en la variable explicativa.

Para solucionar lo anterior, tiene que utilizarse una medida de elasticidad arco, debido a que los cambios en la tarifa invariablemente ocurren a lo largo de la curva, y medir un punto a lo largo de la curva es por tanto inapropiado. Una dificultad adicional surge cuando surgen cambios muy grandes en la tarifa. Además, si éstas son altas y forman un rubro importante en el gasto, la demanda será elástica; por otra parte, si son bajas, la demanda será relativamente inelástica. Esta relación se debe tomar en consideración cuando existen cambios de una baja tarifa a una alta tarifa.

Elasticidad arco convexa:

$$\epsilon_{arc} = \frac{\Delta \text{Log}(q)}{\Delta \text{Log}(p)} = \frac{\text{Log}(q_2) - \text{Log}(q_1)}{\text{Log}(p_2) - \text{Log}(p_1)} \quad (2.4)$$

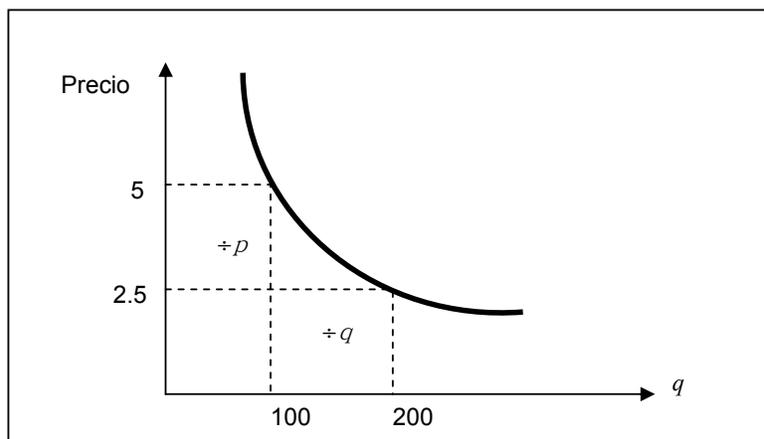
Elasticidad arco lineal:

$$\epsilon_{arc} = \frac{(q_2 - q_1)(p_2 + p_1)}{(q_2 + q_1)(p_2 - p_1)} \quad (2.5)$$

Cabe notar que, finalmente, la expresión 2.5 es totalmente equivalente a la expresión 2.2, reconociendo que ahora se trata del cálculo de una elasticidad arco.

Ejemplo 2.1 Supóngase un nivel inicial de precio de 5, y que a este precio se demandan 100 viajes. Después de haber bajado el precio a 2.5 se observa una demanda de 200 viajes. ¿Cuál es la elasticidad-precio?

Gráficamente, se tiene:



Sustituyendo en la expresión 2.2, se tiene:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\left(\frac{\Delta q}{q}\right) \cdot 100}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \cdot 100}$$
$$\epsilon_{p_x} = \frac{\left(\frac{100}{100}\right) \cdot 100}{\left(\frac{-2.5}{5}\right) \cdot 100} = -2.0$$

donde:

$$\Delta q = (200 - 100) = 100,$$

$$\Delta p = (2.5 - 5) = -2.5$$

Por otra parte, conociendo la elasticidad se podría determinar el impacto, porcentual y absoluto, que tendrá un incremento de precio en el nivel actual de la demanda. Así, si $\epsilon_{p_x} = -0.4$, entonces un 10% de aumento en la tarifa reducirá el tráfico en 4%, e incrementará el ingreso en 5.6% (ya que el ingreso es igual al producto del precio por la cantidad). Si $\epsilon_{p_x} = -1$, entonces un 10% de incremento en el precio reducirá el tráfico en 10%, y dejará el ingreso constante.

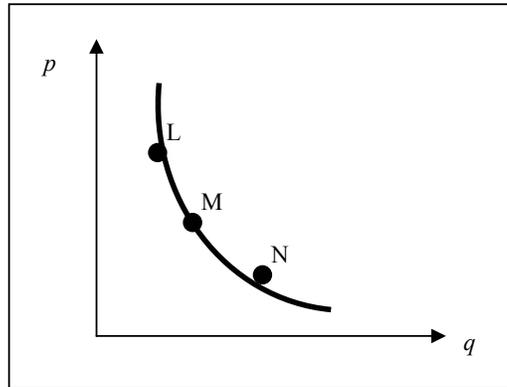
Cuando la elasticidad es menor de -1 (más negativa de -1), se dice que la elasticidad de la demanda es elástica, lo cual significa que el cambio porcentual resultante en la cantidad de viajes será mayor que el cambio porcentual en el precio. En este caso, la demanda es relativamente sensible a los cambios en el precio. Sin embargo, cuando la elasticidad se encuentra entre 0 y -1, se dice que la demanda es inelástica, o relativamente poco sensible.

Lo anterior significa que, en cualquier caso, es importante recordar siempre que la elasticidad puede ser no constante a lo largo de la curva de demanda (salvo casos como el que se verá). Supónganse tres puntos a lo largo de la siguiente curva de demanda (véase la figura 2.4).

En un punto N se tiene que $\sqrt{\epsilon_{p_x}} > 1.0$ (el valor absoluto de la elasticidad es mucho mayor que la unidad), por lo que se dice que es la parte elástica de la curva de la demanda: pequeñas variaciones del precio provocan grandes variaciones de la cantidad demandada.

En el punto M se tiene que $\sqrt{e} = 1.0$ (el valor absoluto de la elasticidad es igual a uno), por lo que se dice que la elasticidad es unitaria porque los cambios de precio provocan un cambio proporcionalmente igual en la demanda (un aumento de por ejemplo, 10% en el precio provoca 10% de reducción en la demanda).

Figura 2.4
Variación de la elasticidad



Finalmente, en el punto L se tiene que $\sqrt{e} < 1.0$ (el valor absoluto de la elasticidad es mucho menor que la unidad), por lo que nos encontramos en la parte inelástica de la curva de demanda: las variaciones del precio afectan proporcionalmente menos las cantidades demandadas. Es decir, el efecto de reducir un precio, apenas si llega a sentirse en un incremento. De hecho, la elasticidad puede llegar a ser cero, lo que implica que por más que se varíe el precio (hacia arriba o hacia abajo), los consumidores siguen demandando la misma cantidad de bienes. Este sería el caso de un transporte monopolizado, en el que la población tiene que desplazarse a sus centros de trabajo, y puede ser objeto de abusos de parte de las empresas prestatarias. En ese sentido, es obligación gubernamental evitar que ocurra.

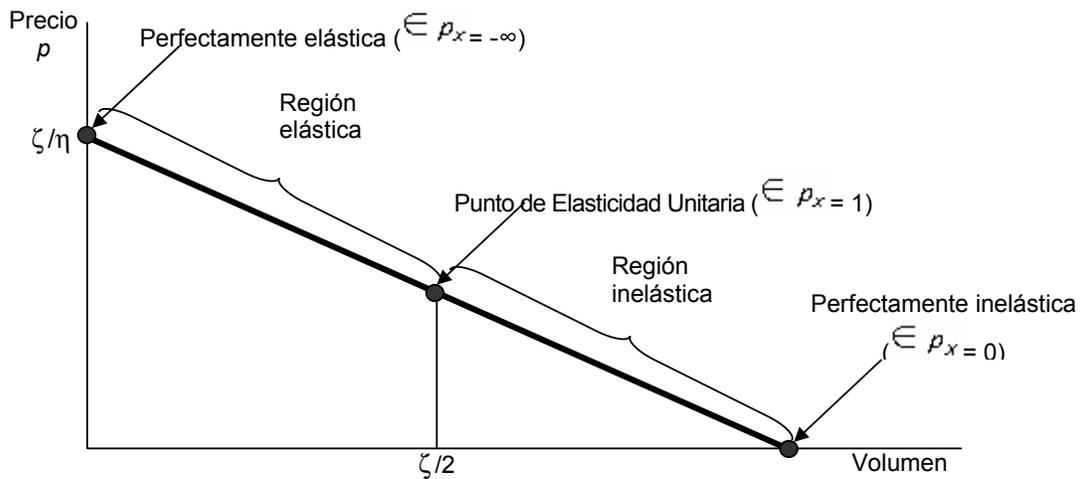
Algunos autores suponen que la función de demanda es una línea recta, y toman el valor negativo de la elasticidad-precio y no su valor absoluto, como tomamos en la figura 2.4. Así, la variación de la elasticidad-precio se puede mostrar en rangos diferentes a los mostrados, que son el caso general de cualquier factor de la elasticidad. Estos rangos se muestran en la figura 2.5 cuya curva de demanda lineal posee varias propiedades interesantes. Por ejemplo, nótese que al moverse sobre la curva hacia abajo, la elasticidad precio de la demanda disminuye, es decir, se hace más inelástica. De hecho, la elasticidad en un punto dado de la curva de demanda es igual a la longitud del segmento vertical por debajo de este punto dividida por la longitud del segmento vertical que se encuentra por arriba de éste. Otra propiedad es que la pendiente de la línea es constante, pero la elasticidad cambia de un valor infinito (∞), donde la demanda intercepta el eje vertical hasta tener un valor de cero (0), donde la demanda intercepta el eje horizontal. Debido a que la curva de demanda cambia a lo largo de la curva es

necesario especificar sobre qué rango de precios o cantidades se está midiendo la elasticidad¹².

En el caso de una demanda inelástica, el cambio proporcional en el precio será mayor que el de la cantidad demandada, y si la demanda es elástica, entonces el cambio proporcional en la cantidad demandada será mayor que el del precio.

La demanda por transporte masivo es altamente inelástica, particularmente en el corto plazo, y en muchos casos el tren urbano es la única forma práctica de viajar hacia el centro de la ciudad en las grandes urbes.

Figura 2.5
Sensibilidad de la demanda de viajes



En el corto plazo, se asume que la elasticidad de la demanda es relativamente baja (-0.1 a -0.4) o inelástica, debido a que las ubicaciones de los productores y consumidores están fijas y estos no tienen otra alternativa sino que realizar el viaje. En el largo plazo, sin embargo, otros factores determinantes de la elasticidad suelen variar. La gente puede cambiar de trabajo o de lugar de residencia, u otros operadores aparecer en la escena.

Es factible decir que tiene sentido cargar mayores tarifas en mercados menos elásticos (mercados donde la elasticidad propia del precio de la demanda es más baja en términos absolutos). Generalmente, se ha encontrado que las elasticidades en Periodos de Máxima Demanda (PMD) son menores que en periodos fuera del PMD, desde que una alta proporción de los viajes en PMD son esenciales (viajes al trabajo o a la escuela) y tienen destinos fijos (al menos en el

¹² C. Jotin Khisty y B. Kent Lall. Transportation Engineering. An Introduction. Editorial Prentice Hall, 1998.

corto plazo). Una proporción más grande de viajes en el periodo fuera del PMD son discrecionales (viajes sociales o de placer), o cambiar de destino (viaje de compras por autobús al centro de la ciudad pueden ser reemplazados por una compra local caminando).

En la bibliografía del área del transporte, es común encontrar la idea de que $\epsilon = -0.33$, en particular en el transporte urbano. En otras palabras, se asume que el transporte es bastante inelástico. Este es un aspecto importante a ser considerado en la política tarifaria, pues un incremento de tarifas en un sector con alta inelasticidad de la demanda, puede provocar que la recaudación total sea ciertamente mayor que con tarifas bajas, aún considerando que aproximadamente uno de cada tres usuarios dejará de demandar el servicio.

La elasticidad precio de la demanda puede medirse en diferentes maneras. La más directa es por series de tiempo de observaciones del nivel de las tarifas y del nivel de pasajeros transportados con esas tarifas. Sin embargo, es importante incluir otros factores que pueden influir en la demanda (tales como los niveles de servicio, ingreso, y la cantidad de automóviles en la población) mediante técnicas estadísticas de multivariantes, como el análisis de regresión múltiple¹³.

Por ejemplo, existe un caso especial de la demanda en el que la elasticidad es constante: la función CES (Constant Elasticity of Substitution) cuya expresión es la siguiente:

$$q = ap^{-\alpha} \quad (2.6)$$

Por lo que aplicando la expresión 2.1, se tiene:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\partial q / q}{\partial p_x / p_x} = \frac{\partial q}{\partial p_x} \cdot \frac{p_x}{q}$$

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\partial (ap^{-\alpha})}{\partial (p)} \cdot \frac{p}{q}$$

O sea,

$$\epsilon_{p_x} = -\alpha ap^{(-1-\alpha)} \cdot \frac{p}{ap^{-\alpha}} = -\alpha$$

En este caso la elasticidad es siempre constante e igual a $(-\zeta)$. Una aplicación importante de este principio consistiría en que de tener una función de demanda similar a la estructura matemática de la CES, se puede aplicar simplemente el método de mínimos cuadrados ordinarios para calcular las elasticidades.

¹³ Nash C.A. Planning for Public Transport. Artículo publicado en : O'Flaherty C.A. Transport Planning and Traffic Engineering. Arnold Editor, 1997.

Por ejemplo, sea una función de demanda como sigue:

$$Y = T^{\alpha} \cdot C^{\beta} \quad (2.7)$$

Donde:

Y = viajes demandados en cierto periodo

T = tiempo de viaje

C = costo (tarifa) pagada por el viaje

Aplicando logaritmos a la expresión 2.7, se tiene:

$$\text{Log}(Y) = \alpha \text{Log}(T) + \beta \text{Log}(C)$$

Que es una función lineal simple, de la que se obtienen los parámetros α y β por regresión lineal.

2.4.2.2 Elasticidad precio cruzada

El anterior concepto de elasticidad relaciona cambios en la cantidad demandada, ante los respectivos cambios en los precios del producto o servicio que se está analizando. Sin embargo, existe la necesidad de conocer el efecto que tendrá el cambio del precio del producto que se analiza en las cantidades demandadas de otro producto; esto se conoce como elasticidad "cruzada" para diferenciarla de la elasticidad directa, que es sobre el mismo producto.

Se le denota con diversas formas:

$$\epsilon_{p_{xy}} = \epsilon_{p_y^x} = \epsilon_{x p_y}$$

Que se interpretan como la elasticidad precio de los cambios en la cantidad demandada de X dado un cambio en el producto Y.

En cualquier caso, lo que se pretende es estimar la elasticidad cruzada del precio; entonces, la siguiente expresión debe ser utilizada:

$$\epsilon_{p_{xy}} = \frac{\text{cambio porcentual en la cantidad demandada de nuestro servicio}}{\text{cambio porcentual en el precio del servicio de la competencia}}$$

$$\epsilon_{p_{xy}} = \frac{\left(\frac{\partial q_x}{q_x}\right)}{\left(\frac{\partial p_y}{p_y}\right)} = \frac{\partial q_x}{\partial p_y} \cdot \frac{p_y}{q_x} \quad (2.8)$$

Matemáticamente

En este caso, el efecto de los cambios de tarifa puede ser positivo o negativo. Así, si los precios del ferrocarril se incrementan, los servicios alimentadores perderían ingreso al ser complementarios. Los servicios carreteros, sin embargo, ganarían más del negocio pues son alternativas competitivas.

De hecho, cuando hay una fuerte competencia entre dos modos de transporte, es probable encontrar también un alto valor de elasticidad cruzada entre los servicios que ofrecen tales modos de transporte, lo que indica que dichos servicios son sustitutos. En cambio, valores bajos de elasticidad cruzada pueden ser un indicador de falta de competencia o de fuerzas monopólicas u oligopólicas.

Ejemplo Supóngase que se conoce la elasticidad-precio del servicio que se ofrece y es de -1.5. ¿Qué pasará con la demanda si le obligan a incrementar el precio en 10%, y transportaba 700 pasajeros?

Datos:

$$\epsilon_{p_x} = -1.5$$

$$\Delta p / p = 0.10$$

$$q^o = 700$$

$$\Delta q = ?$$

$$\Delta p = ?$$

Empleando la fórmula 2.2, se tiene:

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\left(\frac{\Delta q}{q}\right) \cdot 100}{\left(\frac{\Delta p}{p}\right) \cdot 100}$$

Despejando y sustituyendo resulta:

$$\Delta q = (\epsilon_{p_x}) \left(\left(\frac{\Delta p}{p} \right) \right) (q) = (-1.5) (0.10) (700) = -105$$

O, también:

$$\Delta q / q = -105 / 700 = -0.15$$

Esto es, se observaría una disminución de 105 pasajeros, lo que representa el 15% de la demanda original.

Consideremos el caso contrapuesto en el que es la competencia la que aumenta sus precios. Si nuestra empresa transportista mantiene sus niveles tarifarios y la elasticidad-precio cruzada es de 1.5, se observaría un aumento de 105 pasajeros. ¿Por qué?

Lo que sucede es que la fórmula es esencialmente la misma, y dado que son valores semejantes pero con elasticidad con valor positivo, el resultado es numéricamente similar, pero con signo contrario, lo cual es congruente con la idea de que si aumentan los precios de la competencia, se deberá observar un incremento en la demanda.

2.4.2.3 Elasticidad ingreso

Este es otro concepto relacionado con la elasticidad, y se refiere a los cambios que se pueden esperar en las cantidades demandadas de un producto o servicio ante los respectivos cambios en el ingreso de los consumidores o usuarios y es generalmente una elasticidad positiva. Mientras el ingreso se incrementa, la demanda de viajes, medida en número de viajes realizados o la cantidad de kilómetros recorridos, se incrementará. Esto es verdad para los viajes en automóvil, ferrocarril y avión, los cuales se emplean por los grupos de altos ingresos, mientras que los viajes por autobús pueden producir elasticidades negativas ya que conforme el ingreso aumenta la gente usará modos de transporte más veloces y más cómodos.

Por ejemplo, es muy probable que muchas personas al tener ingresos más altos, tiendan a realizar más viajes en transporte privado.

La expresión matemática de esta elasticidad-ingreso, es la siguiente:

$$\epsilon_m = \frac{\partial q}{\partial m} \cdot \frac{m}{q} \quad (2.9)$$

2.4.2.4 Elasticidad de servicio

Es una medida del efecto de los estándares de servicio sobre la demanda de un servicio de transporte. Si un operador de servicios de transporte de carga, frecuentemente retarda sus entregas, probablemente el usuario terminará de contratarlo o ya no lo renovará. En el caso del transporte de pasajeros, se ha demostrado que cuando existen operadores alternos o modos disponibles; por otra parte, las demoras en el servicio llevarán a una pérdida constante de pasajeros. Asimismo, la racionalización del servicio (particularmente cuando los cambios de ruta no son entendidos por los usuarios, o cuando la publicidad es pobre) puede también llevar a una reducción de la demanda.

A manera de ejemplo, es posible introducir un concepto análogo de la elasticidad del nivel de servicio como el cambio porcentual en el volumen de usuarios (comúnmente conocido como "tráfico"), debido a un cambio en la cantidad de autobuses - kilómetro del 1%. Este concepto podría considerarse menos útil que el mencionado en el párrafo anterior. Sin embargo, existen numerosas maneras de variar la cantidad de autobuses - kilómetro (modificando las frecuencias, la densidad de la ruta, el tiempo de operación en el día, o de la cantidad de días operados en la semana); en cada uno de estos casos, es muy probable que se tengan diferentes efectos sobre la demanda)¹⁴.

En realidad, el concepto de elasticidad puede ser fácilmente generalizado a otros tipos de cambios en variables que tienen efecto en la demanda (véase este mismo capítulo). Se pueden encontrar elasticidades en relación con los factores de la función de costo generalizado, tales como tiempos de espera, transbordos, comodidad, tiempo de viaje, recorrido a pie, etc.

Ejemplo (a resolver y comentar por el lector)

Supóngase que los usuarios de un servicio de transporte tienen las siguientes elasticidades:

$$\epsilon_p = \text{elasticidad-precio} = -0.35$$

$$\epsilon_{te} = \text{elasticidad-tiempo de viaje} = -1.05$$

$$\epsilon_{tv} = \text{elasticidad-tiempo de espera} = -1.0$$

¹⁴ Nash C A. Planning for Public Transport. Artículo publicado en : O'Flaherty C.A. Transport Planning and Traffic Engineering. Arnold Editor, 1997.

Además, se tienen sólo tres proyectos para captar mayor demanda:

- A = dar contratos a compañías con 10% de descuento en el transporte de sus empleados
- B = comprar vehículos para bajar el intervalo de paso de 6 a 3 minutos
- C = mejorar las condiciones del camino para incrementar la velocidad en 5%.

¿Qué proyecto debe ser seleccionado si son mutuamente excluyentes?

2.4.3 La elasticidad y el ingreso total

Al calcular la elasticidad de la demanda de un servicio de transporte no sólo será factible estimar el cambio en la cantidad demanda del servicio ante un cambio en el precio o tarifa, sino también estimar el cambio en el ingreso (“revenue”, en inglés) que obtendrá el operador del servicio ante tal cambio. Así, la relación entre la elasticidad de la demanda y el ingreso será la siguiente:

- Si $\sqrt{C_1} \sqrt{v} > 1$ (demanda elástica), entonces la tarifa y el ingreso total estarán inversamente relacionados, por lo que un incremento en la tarifa reducirá el ingreso total, pero una reducción de la tarifa lo aumentará.
- Si $\sqrt{C_1} \sqrt{v} < 1$ (demanda inelástica), entonces la tarifa y el ingreso total estarán positivamente relacionados, en cuyo caso un incremento en la tarifa aumentará el ingreso total, aunque una reducción de la tarifa lo reducirá.
- Si $\sqrt{C_1} \sqrt{v} = 1$ el ingreso total permanecerá constante ante cualquier cambio en la tarifa (aumento o reducción de la tarifa).

2.4.4 Modelos de demanda y cálculo de su elasticidad¹⁵

Sean definidas las siguientes variables:

Q= cantidad de viajes demandados

P= tarifa

T= tiempo generalizado de viaje
(considere que el usuario valora el tiempo de caminar y de espera en dos veces el tiempo a bordo del vehículo)

C_p = elasticidad precio

C_t = elasticidad del tiempo de viaje

a, b, c, y d = parámetros a establecer

Veamos a continuación algunos ejemplos de cálculo de elasticidad a partir de ciertos modelos clásicos.

2.4.4.1 Modelo de elasticidad constante

Sea el siguiente modelo doble logarítmico o lineal logarítmico

$$Q = aP^b T^c \quad (2.10)$$

Aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación, se tiene:

$$\text{Log}Q = \log a + b \log P + c \log T$$

y aplicando la expresión 2.3, tenemos que:

$$C_p = b \quad \text{y} \quad C_t = c$$

¹⁵ Nash, Chris. Introduction to Transport Economics. Study notes. Institute for Transport Studies. The University of Leeds, 1997.

2.4.4.2 Modelos de elasticidad variable

- Exponencial negativa (o semilogarítmico)

$$Q = a e^{(bP+cT)} \quad (2.11)$$

$$\text{ó} \quad \text{Log}Q = \log a + bP + cT$$

$$\alpha \quad C_p = bP \quad \text{y} \quad C_t = cT$$

- Costo generalizado de viaje

$$Q = aG^d \quad (2.12)$$

Donde:

$$G = P + T \text{ (valor del tiempo)}$$

$$\alpha \quad C_G = d, \quad C_P = d(P/G) \quad \text{y} \quad C_T = d(T(\text{Valor del tiempo})/G)$$

- Lineal

$$Q = a + bP + cT \quad (2.13)$$

$$\alpha \quad C_p = b(P/Q) \quad \text{y} \quad C_t = c(T/Q)$$

2.4.5 Casos de aplicación¹⁶

Sirvan los dos siguientes casos para ilustrar la posibilidad de contar con modelos de demanda aplicados a servicios de transporte. Al final del capítulo se incluyen algunos ejercicios.

¹⁶ Ibidem.

A) SERVICIO DE AUTOBUSES (Véase Smith and McIntosh, TRRL SR 37, 1973)

$$Q_D = aP^b M^c e^{(-dT + \sum f DV)} \quad (2.14)$$

donde:

Q= cantidad de viajes demandados

P= tarifa

M = vehículos-kilómetro

T = tendencia del tiempo

DV = variable "dummy" estacional

a, b, c, d, f = constantes a ser estimadas

B) SERVICIO FERROVIARIO (MODELO MOIRA)

$$Q_2 = Q_1 I_E I_P I_T \quad (2.15)$$

donde:

$$I_E = \left((1 + i)^n \left[\frac{PIB_2}{PIB_1} \right] \right)$$

$$I_P = \left[\frac{P_2}{P_1} \right]^{E_P}$$

$$I_T = \left[\frac{T_2}{T_1} \right]^{E_T}$$

donde:

I = tendencia en el tiempo

n = años entre el año base (1) y el año de pronóstico (2)

PIB = Producto Interno Bruto

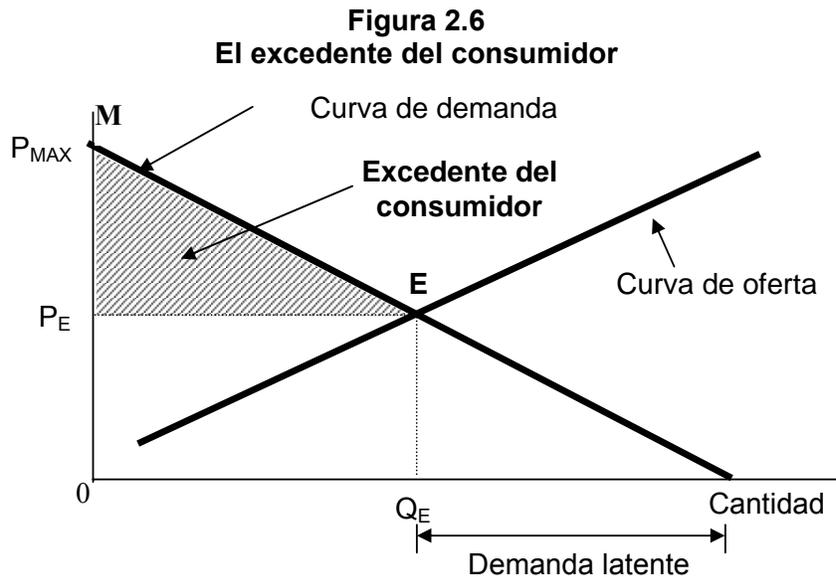
T = tiempo a bordo del vehículo + penalidad por el intervalo del servicio +
+ penalidad por transbordo

2.5 Excedente del consumidor¹⁷

Para definir el excedente del consumidor, en la teoría microeconómica se reconoce la existencia de un precio máximo que cierto consumidor estaría dispuesto a pagar antes de no poder consumir cierto bien. En ese sentido, el excedente del consumidor sirve para medir la disposición a pagar ("WTP = Willingness to pay") por los consumidores o usuarios.

De hecho, este concepto fue identificado por Dupuit desde 1905 al reconocer que existían usuarios de puentes dispuestos a pagar más (valoraban mucho más que otros usuarios) por el uso de tales puentes, pero, aprovechando que el precio de equilibrio está por debajo de su evaluación marginal, pagaban menos de ese precio máximo.

En la figura 2.6 el precio máximo es el precio señalado por el cruce de la curva de demanda con el eje de las ordenadas (punto M). Además, existe el precio de equilibrio, esto es, el cruce de las curvas de oferta y demanda al que deberían venderse los productos que se ofrecen y demandan (punto E). Entonces, existe un área (achurada en la gráfica) que representa la cantidad total de pagos que exceden al precio de equilibrio, que el consumidor estaría dispuesto a dar, pero no lo hace cuando hay un trato justo (de equilibrio).



¹⁷ Islas Rivera, Víctor M. Apuntes de Economía del Transporte. UPIICSA, IPN, 1992

Estos conceptos aplicados al transporte, indicarían (según la teoría microeconómica) la forma de calcular la tarifa óptima por el servicio de transporte, pues, en teoría, bastaría con conocer las preferencias de los usuarios para conocer cuánto estarían dispuestos a pagar antes de dejar de usar una instalación o servicio de transporte. El problema radica en que no es tan fácil realizar tales mediciones, y no es fácil evitar que las personas mientan para no ser perjudicados, y menos fácil resulta valorar el tiempo de las personas. No obstante, aunque tenga deficiencias el método debiera ser intentado para intentar conocer los beneficios totales derivados del uso ciertas partes de la red vial o de transporte.

La figura 2.6 también ilustra un concepto adicional que es útil para los especialistas en transporte: la *demanda latente*; nótese que los viajeros entre Q_E y el punto de intersección de la curva de demanda con el eje de las abscisas no realizan actualmente viajes por el sistema, pero lo harían si el precio por viaje fuera menor que el precio de equilibrio P_E . La cantidad de tales viajes potenciales se conoce como demanda latente. El concepto puede emplearse de varias maneras; por ejemplo, un operador de algún servicio de transporte puede esperar incrementar su demanda al introducir un descuento para aquellos que realicen viajes fuera del periodo de máxima demanda, para lo cual es preciso estudiar la demanda latente. Así, el mejoramiento en los sistemas de transporte puede ser medido en términos del cambio en el excedente del consumidor.

Ahora si consideramos que la función de demanda es una curva convexa con las propiedades matemáticas de una función de demanda "bien comportada", se tendría una gráfica como la contenida en la figura 2.7.

En esta figura 2.7 se pueden apreciar tres datos importantes:

CU = costo unitario, o sea costo de producir una unidad

P_1 = precio de equilibrio de las fuerzas del mercado

Q_1 = cantidad de bienes o servicios ofrecidas al precio P_1

Existen, en consecuencia, varias áreas de interés:

Área A = excedente del consumidor. Total de pagos que los usuarios podrían hacer, pero no hacen;

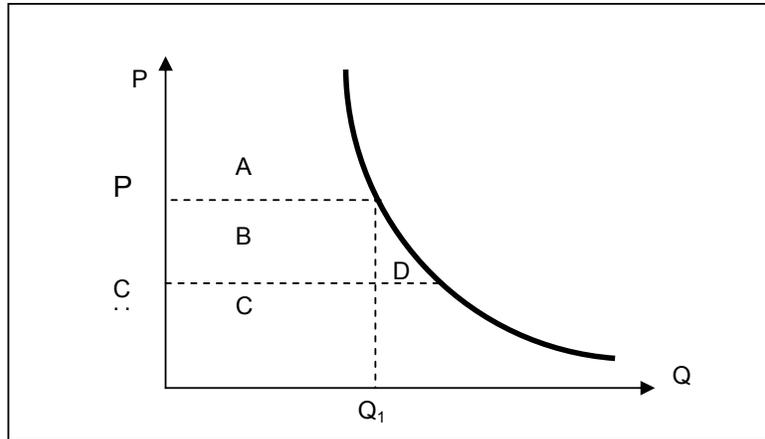
Área B = ganancia total ($P_1 \times Q_1$) - ($CU \times Q_1$)

Área C = costos totales ($CU \times Q_1$)

Área B + C = Ingreso total de la empresa ($P_1 \times Q_1$)

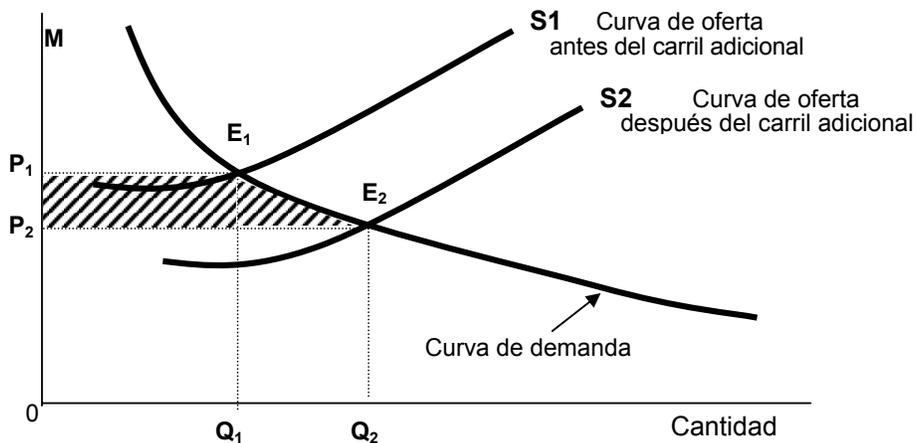
Área D = "dead loss"; esto es, el excedente del consumidor perdido, lo que a su vez puede considerarse como la pérdida social causada por cobrar una tarifa por encima del costo CU.

Figura 2.7
Áreas debajo de la curva de demanda



Como se puede comprobar, existen muchas aplicaciones posibles partiendo de los anteriores conceptos. Por ejemplo, supongamos ahora la figura 2.8, que muestra el caso de un camino el cual presenta una oferta significada por la curva de tráfico S1, la cual intercepta la curva de demanda en E1. Un carril adicional al camino al ser construido, desplaza la curva de oferta S1 a S2 y, por tanto, intercepta la curva de demanda en E2. El cambio en el excedente del consumidor puede ser cuantificado como el área trapezoidal P1P2E2E1, o $[(P_1 - P_2)(Q_1 + Q_2)] / 2$.

Figura 2.8
Cambio en el excedente del consumidor



En general, el beneficio de la comunidad es igual al área bajo la curva entre el origen y el punto Q1, el valor total del mercado es el área $0P_1E_1Q_1$, y el excedente

del consumidor o beneficio neto de la comunidad es la diferencia entre estas dos áreas, o sea, el área que se extiende entre los puntos P_1E_1 y M (donde la curva de demanda cruce hipotéticamente el eje vertical en nuestra gráfica)¹⁸. Así, el área achurada ($P_1P_2E_2E_1$) mide el cambio en el excedente del consumidor al pasar al nuevo punto de equilibrio en E_2 .

Algunas aplicaciones importantes de esta teoría serían, entre muchas otras:

- La determinación de tarifas de equilibrio diferenciadas para cada usuario ("extracción del excedente del consumidor") sin disminuir la demanda, esto es, aplicando métodos de selección o "discriminación" de usuarios, siempre que sea posible (al margen de cuestiones éticas);
- La determinación de un impuesto a la circulación en un monto acorde con las valoraciones de cada usuario;
- El cálculo de beneficios sociales, para una mejor aplicación del método costo/beneficio;
- Bases teóricas para la medición de la preferencia establecida o declarada ("Stated Preference") para conocer los pesos relativos que el usuario asigna a factores no monetarios (se pueden ver cómo los usuarios intercambian ahorro en el dinero pagado por el servicio por otros atributos del servicio, manteniendo el mismo nivel de demanda).

2.6 Análisis preliminar de la oferta de transporte

Por supuesto que el tema de la oferta de transporte también ha sido analizado por los economistas, aunque probablemente con mucho menos énfasis y volumen que en el caso de la demanda. En una publicación posterior de esta serie habremos de dedicarle mucho más extensión al análisis de la oferta, no sólo desde el punto de vista puramente económico sino con los elementos técnicos y operativos que también la definen. No obstante, hemos considerado conveniente incluir en el presente trabajo un primer análisis de la oferta de transporte de tal manera que nos permita comparar su comportamiento con el caso de la demanda del transporte.

2.6.1 El origen de la oferta

Los servicios de transporte pueden ser ofrecidos por:

- Los gobiernos: en el ámbito nacional, regional o local, En este caso, los objetivos de la empresa de transporte serán, entre otros:

¹⁸ C. Jotin Khisty and B. Kent Lall. Transportation Engineering. An Introduction. Editorial Prentice Hall, 1998

- 4 Garantizar al menos un cierto nivel (“umbral inferior”) de accesibilidad para todos
 - 4 Maximizar los beneficios para los usuarios del servicio
 - 4 Obtención de beneficios para no usuarios por medio de reducción de congestión y daño ambiental causado por el servicio
 - 4 Promoción del desarrollo económico
- Empresas privadas relacionadas con la prestación de servicios de transporte. En este caso, los objetivos del operador comercial del servicio de transporte será la maximización de sus propios beneficios (ingresos - costos).
 - Individuos, es decir, usuarios que realizan o incluso ofrecen un servicio de transporte (caminar, automóviles, bicicletas, etc.)

La oferta de los servicios de transporte usualmente involucra la provisión de vías, terminales, y la operación de vehículos, pero estos no siempre son provistos, sostenidos o controlados por un sólo proveedor.

2.6.2 Diferencias modales

La facilidad con la cual la oferta de transporte puede ser incrementada o reducida dependerá de la naturaleza del modo particular de transporte empleado. En un extremo, un hombre-camión puede ofrecer una oferta de transporte al prestar un servicio de desplazamiento de carga con la compra de un camión de segunda mano. En el otro extremo, la prestación de servicio ferroviario de carga requiere instalaciones de transporte donde están involucrados vehículos, terminales y vías, esto requerirá un considerable gasto en capital y un largo periodo en la preparación y planeación de la operación del servicio de transporte.

Así, con los más complejos sistemas de transporte existirán problemas concernientes con el recorte o reducción de la oferta del servicio de transporte. En algunos casos, la oferta de transporte será especializada, por lo que los modos al diseñarse para un cierto trabajo, no será fácil ni rápido cambiar su operación y localización (servicios ferroviarios). Por el contrario, otros servicios o vehículos son más flexibles, permitiendo el uso de los mismos para una gran variedad de usos (transporte carretero).

2.6.3 El exceso de oferta de transporte

Por varias razones, el transporte es comúnmente ofrecido en cantidad excesiva. Una producción no utilizada, tal como asientos vacíos o espacio para carga, es un gasto que no puede ser almacenado. La demanda de servicios de transporte es frecuentemente desigual a través del tiempo. Muchos servicios de transporte, particularmente en el caso de pasajeros, son operados en función de una programación de despacho de los servicios, se utilice o no toda la capacidad. Otra causa de sobreoferta surge debido a la indivisibilidad de la oferta. Las vías tienen cierta capacidad, y los vehículos son fabricados en un rango limitado de tamaños.

En algunos casos, las instalaciones de transporte se proveen para incentivar el crecimiento económico o el desarrollo de una región, y la capacidad excederá el tráfico potencial hasta que tal crecimiento ocurra.

La sobreoferta puede surgir en situaciones donde exista demasiada competencia. En situaciones competitivas, los operadores no reducirán la cantidad de sus despachos sin considerar los servicios de sus competidores, debido a que sus servicios se harán menos atractivos, y sufrirán una reducción en su participación en el mercado.

2.6.4 Elasticidad de la oferta

Este es un concepto equivalente al de la elasticidad de la demanda, aunque tiene sus propias características.

2.6.4.1 Definición de la elasticidad de oferta

La elasticidad precio de la oferta se calcula como el porcentaje de cambio en la cantidad ofrecida (QS), dividida por el cambio porcentual en el nivel de tarifa (F).

$$\epsilon_{p_x} = \frac{\text{cambio proporcional en la cantidad ofrecida}}{\text{cambio proporcional en el precio}}$$

2.6.4.2 Factores que determinan la elasticidad de la oferta

1. La facilidad de entrada en el mercado de transporte es un factor determinante de la elasticidad de la oferta.
2. Si las instalaciones de transporte pueden ser fácilmente convertidas de un uso a otro, por ejemplo de pasajeros a carga, entonces la oferta será más elástica que en una situación donde la transferencia de equipo es difícil, cara o imposible.
3. La oferta de una capacidad extra es frecuentemente vinculada no sólo a la oferta de vehículos, sino también a la oferta de energía.

El administrador de transporte debe considerar muchos factores en la toma de decisiones por dos principales razones:

- a) El producto del transporte es complejo. No es sólo cuestión de mover bienes de un lugar a otro, sino que dicho movimiento debe ser, realizado con seguridad y a tiempo. El servicio de transporte por si mismo es un producto mezclado con intermodalismo a través de los arreglos de la carga, involucrando carretera\ mar-carretera\ ferrocarril-carretera\ aéreo, y cualquier otra combinación entre los diferentes modos. Existen también cortos periodos de notificación de variaciones en los requerimientos del cliente con cambios en el tiempo de despacho, ruta o modo, y esto frecuentemente no se ajustará a una relación simple precio-producto.
- b) La demanda de transporte se deriva de otros patrones de demanda, esto raramente da una satisfacción directa dado que las personas o bienes no son movidos para mejorar o satisfacerlos, sino por la demanda de ellos en otra parte. La gente usualmente viaja porque prefiere vivir a cierta distancia de su trabajo, por vacaciones, recreo o negocios; poca gente viaja sólo por hacerlo. Por lo que los operadores de transporte necesitan saber las demandas básicas de las necesidades de transporte, y si éstas pueden ser pronosticadas; entonces, la demanda de transporte ser pronosticada más fácilmente.

2.6.5 El análisis de la oferta

Los costos incurren en la compra de los factores de producción para ser utilizados como insumos en el proceso de producción de servicios de transporte. El costo de producir cualquier servicio de transporte en particular depende de dos factores:

- Las relaciones técnicas entre las cantidades de los insumos y la cantidad de servicio de transporte producido (la función de producción del servicio de transporte)
- Las relaciones económicas entre las cantidades de insumos y sus precios

Los dos conjuntos de relaciones se combinan para dar una relación entre la cantidad de producto y el costo de producir el servicio.

Por su naturaleza como proveedoras de servicios a diferentes individuos, las compañías de transporte se consideran como empresas multiproducto en la cual el producto es heterogéneo. Sin embargo, como ya se vió, la unidad de medición más común del producto por parte de una empresa de transporte es la cantidad de pax-km, o la cantidad de ton-km según sea el caso.

Un factor importante que se debe tener en mente es aquel relacionado con lo atractivo de los servicios de transporte al público que en general es la facilidad con la cual pueden ser utilizados. Esto cubre una variedad de puntos:

- Qué tan fácil es encontrar los servicios
- Qué tan bien se complementan los servicios en la red de transporte, y la facilidad de transbordo en los puntos donde se realizan
- Qué tan fácil es entender la estructura de la tarifa para pagar lo justo.

2.7 Ejercicios de aplicación

2.7.1 Servicio de autobuses: cálculo de elasticidad¹⁹

Supóngase que la demanda de un servicio de autobús está dado por:

$$Q=10,000P^{-0.5}T^{-0.4}$$

Además supóngase que:

Tiempo a bordo del vehículo = 10 min

Tiempo de espera = 10 min. α (x2= 20 min)

Tiempo de caminar = 5 min. α (x2= 10 min)

Tarifa promedio = \$5

El operador de este servicio desea conocer el efecto sobre la demanda de doblar las tarifas y la frecuencia del servicio simultáneamente, entonces:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-0.5} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{-0.4} = \left(\frac{10}{5}\right)^{-0.5} \left(\frac{30}{40}\right)^{-0.4} = 0.79$$

Por lo que la demanda bajaría en un 21%; no obstante, el ingreso aumentaría en un 58% (=2x0.79)

Nota: Se asume que el tiempo de espera es inversamente proporcional a la frecuencia, y una forma funcional multiplicativa.

Extensión:

Si se asumiera una forma funcional lineal (aditiva), se tendría que:

$$\frac{Q_2 - Q_1}{Q_1} = E_P \frac{(P_2 - P_1)}{P_1} + E_T \frac{(T_2 - T_1)}{T_1} = -0.5(1) + (-0.4)(-0.25) = -0.4$$

Por lo que la demanda bajaría en un 40%, y el ingreso aumentaría en un 20%.

¹⁹ Ibidem.

2.7.2 Servicio ferroviario: cálculo de elasticidad

Supóngase un modelo de tipo MOIRA, con un tiempo generalizado de viaje expresado como:

$$T = \text{tiempo a bordo del vehículo} + [2.5 \times (\text{tiempo empleado en transbordos}) + 0.1 \times (\text{tiempo a bordo del vehículo})] \times \text{núm. de transbordos} + 0.4 \times (\text{intervalo del servicio})$$

Con una elasticidad del tiempo generalizado de viaje de $E_T = 0.8$.

El servicio actual opera cada confín con una duración de 2 sin intercambio de tren. De los cambios propuestos en el servicio que a continuación se enlistan, diga cuál es el mejor en términos de la captación de demanda.

1. Reducir el tiempo a bordo del vehículo a 110 min
2. Reducir la frecuencia del servicio a la mitad
3. Un intercambio (transbordo) de trenes con duración de 5 minutos
4. Tiempo generalizado inicial $T_1 = 120 \text{ min} + (0.4 \times 60 \text{ min}) = 144 \text{ min}$

Dado que:

$$Q_2 = Q_1 I_E I_P I_T \quad \text{entonces:} \quad \frac{Q_2}{Q_1} = I_E I_P I_T$$

Dado que la única variable que cambia es el tiempo generalizado de viaje:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = I_T = \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{E_T}$$

SOLUCIÓN:

| Opción | T_{G2} (en min) | Cambio en la demanda del servicio |
|--------|-------------------|-----------------------------------|
| 1 | 134.0 | +5.9% |
| 2 | 168.0 | -11.6% |
| 3 | 168.5 | -11.8% |

2.7.3 Ejemplo de cálculo de ingreso total

Una curva de demanda estimada para una compañía de autobuses está dada por $P = 10 - 0.05Q$, donde P es el precio de un boleto de ida, y Q la cantidad de boletos vendidos por hora. Determinar el ingreso total a lo largo de la curva.

SOLUCIÓN:

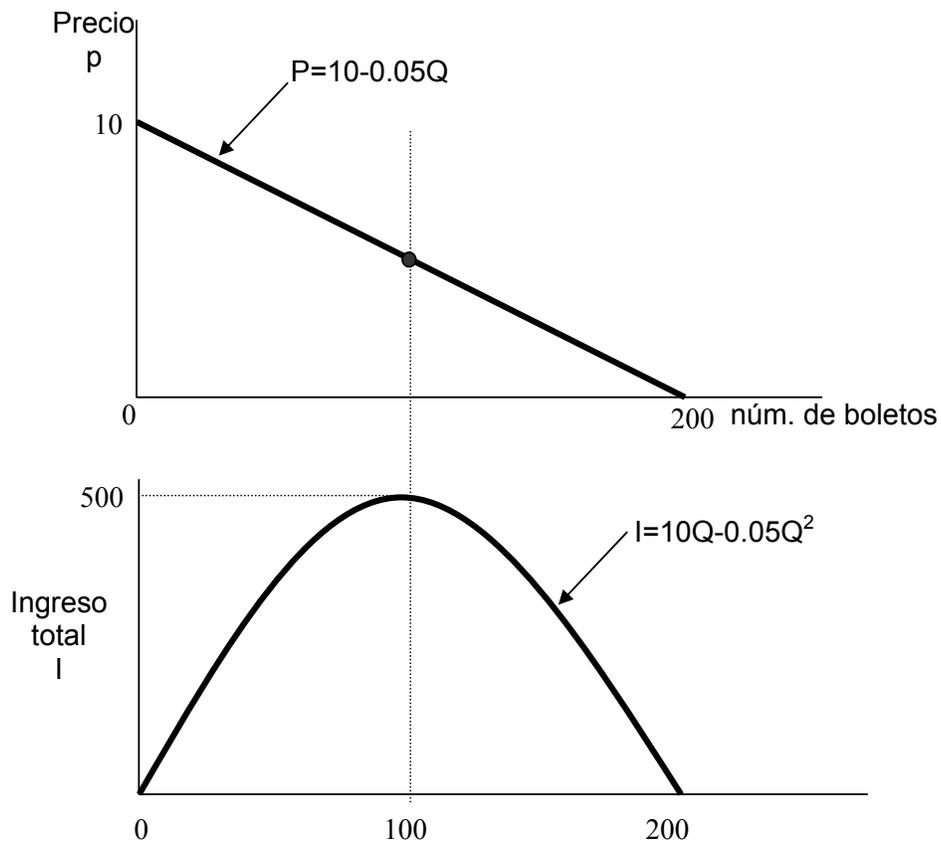
$$P=10-0.05Q$$

$$I=(10-0.05Q) \times Q$$

Por tanto: $I = 10Q - 0.05Q^2$ para maximizar la función derivamos e igualamos a cero

$$dI/dQ = 10 - (0.05 \times 2)Q = 0$$

Así, $Q= 100$ cuando el ingreso es máximo ($I=500$)



2.7.4 Ejemplo de función de demanda con costo generalizado

La función de demanda de un sistema de transporte público de pasajeros de los suburbios hacia el centro de una gran ciudad, está dada por:

$$Q = T^{-0.3} P^{-0.2} A^{0.1} I^{-0.25}$$

donde:

Q = núm. de viajes en el sistema

T = tiempo de viaje del recorrido (horas)

P = tarifa del servicio

A = costo de viajar en automóvil

I = ingreso promedio (pesos)

- Actualmente 10,000 usuarios por hora utilizan este sistema de transporte, pagando una tarifa única de \$10 por viaje. ¿Cuál sería el cambio en la demanda si la tarifa se reduce a \$9?, ¿Cuánto ganaría la compañía por hora con esta opción?
- Viajar por automóvil tiene un costo actual de \$30 (incluyendo estacionamiento). Si la tarifa de estacionamiento se aumenta en \$3, ¿Cómo afectará esto la demanda en el sistema de transporte público?
- Si el ingreso promedio de los automovilistas es de \$10,000 por año, ¿qué aumento en el salario de los automovilistas sería necesario para cubrir los nuevos costos de viajar en automóvil, debido al alza en la tarifa de estacionamiento?

SOLUCIÓN:

- El modelo de demanda presentado en este problema es del tipo Kraft, por lo que la elasticidad precio de la demanda en el sistema de transporte público será:

$$\frac{\partial Q}{\partial P} \frac{P}{Q} = -0.2$$

Lo anterior significa que una reducción del 1% en la tarifa del servicio producirá un 0.2% de incremento en la demanda de este servicio. Debido a que la disminución en la tarifa es $(10 - 9)/10 = 10\%$, se puede esperar una baja del 2% en la demanda del servicio. Dicha demanda será ahora de $10,000 + (10,000 \times 0.02) = 10,200$ pasajeros.

El cambio en el ingreso será:

$$I_1 = P_1 Q_1 \quad I_1 = 10,000 \text{ pax a } \$10/\text{por viaje} = \$100,000$$

$$I_2 = P_2 Q_2 \quad I_2 = 10,200 \text{ pax a } \$9/\text{por viaje} = \$91,800$$

Por lo que la compañía perdería \$8,200/h

b) La elasticidad cruzada del precio en el caso del uso del automóvil es de 0.1, es decir:

$$\frac{\partial Q}{\partial P_A} \frac{P_A}{Q} = 0.1$$

Esto significa que un aumento del 1% en el costo del automóvil (incluyendo estacionamiento) producirá un incremento del 0.1% en la demanda del sistema de transporte público. Así, un aumento de \$3 en la tarifa de estacionamiento representa el 10% de la tarifa anterior de \$30, por tanto, un 10% en el costo del uso del automóvil subirá la demanda del sistema de transporte público en un 1%, de 10,000 a 10,100 pasajeros.

c) La elasticidad ingreso en este caso estará dada por:

$$\frac{\partial Q}{\partial I} \frac{I}{Q} = -0.25$$

Lo cual significa que un aumento en el ingreso de los automovilistas del 1% producirá una reducción en la demanda del sistema de transporte público del 0.25% o $\epsilon_{Q/I} | 1\% \text{ de b)}$; de ahí que:

$$\frac{1\%}{(\partial I/I)} = -0.25 \quad \text{y} \quad \frac{\partial I}{I} = \frac{1\%}{-0.25} = 0.04 = 4\%$$

Resulta que sería necesario 4% de incremento en el salario de los automovilistas para compensar el aumento del 10% en el uso del automóvil (debido al incremento de estacionamiento). Si el ingreso actual es de \$100,000, el alza en éste sería de \$4,000 para hacer variar la opinión de automovilistas que planean cambiar al sistema de transporte público.

2.7.5 Otro ejemplo de elasticidades

En una ciudad de tamaño mediano, un incremento del 15% en la gasolina ha provocado un aumento en el uso del sistema de transporte público de autobuses del 7%, y un 9% en la reducción del uso o consumo de la gasolina. Calcular la elasticidad directa y cruzada de la demanda.

SOLUCIÓN:

Sea:

P_1 = precio de la gasolina antes del aumento

P_2 = precio de la gasolina después del aumento

Q_1 = cantidad de gasolina consumida antes del aumento

Q_2 = cantidad de gasolina consumida después del aumento

Entonces, la elasticidad directa será:

$$Q_1 \times 0.91 = Q_2$$

$$P_1 \times 1.15 = P_2$$

$$e_{P(g)} = \left(\frac{\Delta Q_g / Q_g}{\Delta P_g / P_g} \right) = -\frac{0.09}{0.15} = -0.60$$

$$e_{P_g} = \left(\frac{\Delta Q_{TP} / Q_{TP}}{\Delta P_g / P_g} \right) = \frac{0.07}{0.15} = 0.46$$

2.7.6 Otro ejemplo de ferrocarriles

Una empresa ferroviaria ha anunciado algunos planes para mejorar el servicio de transporte de carga sobre el tramo ferroviario Terminal del Valle de México - Nuevo Laredo, para ser ejecutados en el año 2002. Actualmente, la empresa proporciona un servicio horario entre este par Origen-Destino, transportando anualmente 40 millones ton-km.

Con base en un modelo del tipo MOIRA, estime los efectos en la demanda a los cambios siguientes:

- a) Asuma un crecimiento anual en el Producto Interno Bruto (PIB) del 4%, una elasticidad de la demanda ferroviaria con respecto al PIB de 1.4 y una tendencia positiva en el tiempo del 1% del tráfico por año, ¿Cuál sería la demanda del servicio ferroviario de carga en este tramo en el año 2002, asumiendo tarifas y tiempos de viaje constantes?
- b) Se propone que el tiempo de viaje promedio entre el par Origen-Destino se reduzca de las 44 que actualmente tiene el recorrido a 40 para el 2002. Asumiendo una elasticidad de la demanda ferroviaria con respecto al tiempo generalizado de viaje de -0.8, y que la penalidad del intervalo del servicio es 0.4 veces el intervalo del servicio, ¿Cuál sería el impacto del mejoramiento del servicio en la demanda del servicio ferroviario de carga en este tramo en el año 2002?

SOLUCIÓN:

$$I_E = \left((1 + i)^n \left[\frac{PIB_2}{PIB_1} \right] \right) = \left[(1 + 0.01)^2 (1.04)^{1.4} \right] = 1.07768$$

a)

Por lo que la demanda por este servicio aumentará en un 7.77% (aproximadamente 43.11 millones de ton-km).

$$b) \quad T_{G1} = 2,640 + 0.4(60) = 2,664 \text{ min}$$

$$T_{G2} = 2,400 + 0.4(60) = 2,424 \text{ min}$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = I_T = \left[\frac{T_2}{T_1} \right]^{E_T} = \left[\frac{2424}{2664} \right]^{-0.8} = 1.07845$$

Por ello, la demanda por este servicio aumentaría en un 7.84% (aproximadamente 43.14 millones de ton-km). Nótese que, si se combinaran las opciones a) y b), la demanda se incrementaría en un 16.2%.

2.7.7 Cálculo de elasticidad y excedente del consumidor

Una compañía que opera un servicio de transporte de pasajeros a través de autobuses, cuenta con una flota vehicular de 100 unidades, cada una con capacidad de 40 asientos. Se ha propuesto incrementar el tamaño de la flota en un 20% y a su vez reducir la tarifa del servicio de \$3 a \$2 por viaje (el viaje de origen a destino tiene una duración de 1).

Calcule el cambio en el excedente del consumidor y la elasticidad precio de la demanda. Asumir un factor de carga del 90%. Asimismo, se ha anticipado que el mejoramiento incrementa el factor de carga a un 95%.

¿Perdería dinero la compañía con la opción de mejoramiento?. Comente.

Nota: El factor de carga es una medida de la disponibilidad de asientos, un factor de carga igual a 1.0 significa que todos los asientos están ocupados.

SOLUCIÓN:

Con la situación actual:

$$Q_1 = 100 \text{ autobuses} \times 40 \text{ asientos} \times 0.90 \text{ (factor de carga)} = 3,600 \text{ pax/h}$$

$$I_1 = 3,600 \times 3.00 = \$10,800/\text{h}$$

Con la mejora del servicio:

$$Q_2 = 120 \text{ autobuses} \times 40 \text{ asientos} \times 0.95 \text{ (factor de carga)} = 4,560 \text{ pax/h}$$

$$I_2 = 4,560 \times 2.50 = \$11,400/\text{h}$$

Por lo que la compañía ganaría $\$11,400 - \$10,800 = \$600/\text{h}$

Cambio en el excedente del consumidor:

$$\Delta EC = \frac{(3.00 - 2.50)(3,600 + 4,560)}{2} = \$2,040 / \text{h}$$

Elasticidad precio de la demanda:

$$e_{arc} = \frac{(Q_2 - Q_1)(P_2 + P_1)}{(Q_2 + Q_1)(P_2 - P_1)} = -\frac{(960)(5.50)}{(8,160)(0.50)} = -1.29$$

Una función de demanda se representa con la ecuación:

$$q = 200 - 10 p$$

Donde q es la cantidad de viajes realizados, y p es el precio por viaje.

Encuentre la elasticidad precio de la demanda cuando:

$q = 0$, $q = 50$, $q = 100$, $q = 150$, $q = 200$ viajes,

correspondiendo:

$p = 20$, $p = 15$, $p = 10$, $p = 5$, $p = 0$ pesos.

3 Modelos para el pronóstico de la demanda del transporte

Este tema tiene diversos enfoques y temas de interés en la bibliografía existente. Sin embargo, también hay una deficiencia generalizada: el concepto es demasiado abstracto y no considera realmente la naturaleza intrínsecamente espacial del fenómeno de transporte. Queda a los especialistas en transporte la tarea de desarrollar una teoría de demanda del transporte que vincule los aspectos teóricos tradicionales con las características del transporte. Sea el presente esfuerzo una primera contribución al respecto.

Por otra parte, se debe reconocer que uno de los problemas centrales de la teoría microeconómica es conocer la demanda total, es decir, la demanda que enfrenta toda la economía y no la que genera una sola persona o que recibe una sola empresa. Una primera respuesta diría que la demanda total no es sino la suma de las demandas individuales. Sin embargo, existen muchas críticas a este planteamiento. En particular, aún quedan varias preguntas: ¿cómo hacer la agregación?, ¿todos los usuarios tienen las mismas preferencias?, ¿la cantidad demandada total tiene la misma respuesta a cambio en el precio que la mostrada por un sólo consumidor?, etcétera.

Aunque la teoría microeconómica puede tener algunas respuestas a las anteriores preguntas, existe una alternativa teórica: estimar la demanda total como una variable agregada derivada de otras variables agregadas. Este enfoque puede resultar más adecuado y simple.

En todo caso, hay diversas técnicas para estimar la demanda del transporte. Los cinco métodos que describiremos en la siguiente secciones y que consideramos son los más conocidos son: los modelos de tendencia, las estimaciones econométricas de modelos de regresión múltiple, la programación lineal, las técnicas de simulación con la matriz insumo producto, y los modelos secuenciales o de las cuatro fases. En este capítulo analizaremos los cuatro primeros casos, dejando el análisis de los modelos secuenciales para el capítulo siguiente.

3.1 Modelos de tendencia

La principal característica de estos modelos de estimación de la demanda radica en que asocian la variación de la demanda al paso del tiempo. Así, se asume que los factores que afectan la demanda de transporte van a mantener en el futuro la tendencia o comportamiento pasado. Entre los modelos de estimación de la demanda más comunes se encuentran los siguientes.

- Tendencia lineal
- Tendencia geométrica
- Tendencia exponencial
- Tendencia exponencial modificada
- Curva de Goempertz
- Curva logística

A continuación se describe brevemente cada uno de los modelos de estimación anteriores.

3.1.1 Tendencia lineal

Se asume un comportamiento como el de una línea recta:

$$Y = m t + b \quad (3.1)$$

donde:

Y = demanda de transporte (viajes, pasajeros, toneladas, pax-km, ton-km, etc.).

t = tiempo (año, periodo, antigüedad, etc.).

m, b = parámetros a obtener por el método de mínimos cuadrados.

Por la aparente facilidad de este modelo se omitirá mayor explicación sobre las técnicas de calibración y situaciones de uso. Sin embargo, cabe reconocer que la aplicación de este modelo esta sujeta a que el fenómeno de crecimiento realmente sea lineal (es decir, a una tasa de crecimiento constante), que el coeficiente de correlación y las demás pruebas estadísticas resulten satisfactorias, y que se tome este modelo sólo como un primer acercamiento al estudio de la tendencia de la

demanda. Este último punto es de la mayor importancia puesto que el paso del tiempo no es realmente lo que explica el comportamiento de la demanda de transporte sino el hecho de que, con el paso del tiempo, se presentan otros fenómenos (mayor cantidad de personas, menores niveles de ingreso, incremento de la urbanización, etcétera), que si están causalmente relacionados con la demanda de transporte y ello en sí es lo que provoca que podamos captar, mediante el uso de la variable que identificamos como tiempo (t), el efecto de dichas variables. En realidad, este último comentario es válido, en general, para varios de los modelos tendenciales siguientes o incluso para otras técnicas de calibración de modelos de demanda, pero ya no insistiremos en ello.

3.1.2 Tendencia geométrica

Sigue un patrón de crecimiento a una tasa constante (bajo un esquema similar a los modelos de crecimiento con interés compuesto), según la siguiente expresión.

$$Y_f = Y_p (1+r)^t \quad (3.2)$$

donde:

- Yf = demanda futura
- Yp = demanda presente
- r = tasa de crecimiento por periodo, año, etc
- t = tiempo (año, periodo, antigüedad, etc)

Ejemplo 3.1

¿Cuál es la tasa de crecimiento, si $Y_f = 18,000$ viajes, $Y_p = 10,000$, y $t = 13$ años?

Respuesta:

$$r = \left(\sqrt[t]{Y_f/Y_p} \right) - 1 = \left(\sqrt[13]{18,000/10,000} \right) - 1 = 0.04625$$

o sea, 4.6% de crecimiento por período.

3.1.3 Tendencia exponencial

Estos modelos muestran un crecimiento aún más notorio que la tendencia geométrica.

$$Y = a (b^t) \quad (3.3)$$

o, aplicando logaritmos,

$$\log Y = \log a + t \log b$$

donde:

Y y t = se definen como en los anteriores casos,

a y b = parámetros a determinar por regresión lineal simple.

Este sería un modelo mas realista en la mayoría de los casos en que se está analizando la demanda de transporte, la cual se caracteriza por tener un gran dinamismo que se traduce en un crecimiento no constante.

3.1.4 Tendencia exponencial modificada.

En este modelo, se asume que la demanda tiende a crecer hasta un límite predeterminado que podría considerarse un nivel de saturación o de capacidad.

Se expresa mediante la siguiente ecuación.

$$Y = K + a * b^t \quad (3.4)$$

donde K es el límite de crecimiento, y las demás son variables similares a los casos anteriores.

En realidad, como resulta evidente al comparar las expresiones 3.3 y 3.4, la principal diferencia entre este modelo y el anterior radica precisamente en el factor K que reconoce un límite al crecimiento de la demanda. Este puede ser el caso del crecimiento de flujo vehicular que pasa por una arteria determinada y que no podría tener un valor superior a la capacidad de dicha vía, siendo dicho dato el parámetro que, exógenamente, se le podría aplicar al modelo para su calibración y uso. Por supuesto, dicha calibración ya no podría ser por medio del método de mínimos cuadrados, sino que requiere programas para funciones no-lineales.

3.1.5 Curva de Goempertz

En este caso, se tiene un comportamiento en forma de "S" inclinada hacia delante. Este fenómeno implica un crecimiento muy lento al principio, una fase de gran crecimiento, una fase de disminución de la tasa de crecimiento y una fase de saturación y mucho menor tasa de crecimiento.

$$\log Y = \log K + b^t * \log a \quad (3.5)$$

Como se puede observar, aunque la estructura matemática parece similar a la anterior, y hasta se puede tener la "ilusión óptica" de que la expresión 3.5 es equivalente a la expresión 3.4 pero aplicando logaritmos, en realidad es muy diferente, aunque ciertamente, tiene los mismos elementos o variables.

3.1.6 Curva logística

Este es un modelo con un comportamiento similar al anterior, pero más "suavizado" y con una estructura matemática radicalmente diferente, como se puede observar a continuación.

$$Y = \frac{K}{1 + b e^{-4at}} \quad (3.6)$$

donde e es la base de los logaritmos neperianos, y los demás elementos se definen como en los otros casos anteriores.

3.2 Regresión múltiple

La principal limitante de los modelos tendenciales como los que se describieron en la sección anterior, radica precisamente en que casi toda o toda la capacidad explicativa del modelo depende del paso del tiempo. Sin embargo, como ya se comentó, en ocasiones se desea contar con modelos que incluyan el efecto de otras variables más vinculables con el comportamiento de la demanda de transporte.

En estos casos, se pueden usar las técnicas econométricas de regresión múltiple para tratar de estimar funciones lineales o no lineales de varias variables. Comúnmente, la variable dependiente es la unidad de demanda que se desea estimar; y se pueden emplear diversas variables independientes o explicativas.

Por ejemplo, si se desea conocer la demanda total del sector transporte medida en el valor bruto de la producción, se podrían usar algunas variables como son el producto interno bruto, la población, etc.

Expresando lo anterior en forma matemática, tenemos:

$$VBPST = f(\text{producción, población, ingreso, precio, etc.}) \quad (3.7)$$

donde:

VBPST = Valor Bruto de la Producción del Sector Transporte

Ejemplo 3.2

Un modelo de estimación de la demanda de transporte ferroviario de pasajeros en el Sector Interurbano para Inglaterra⁽²⁴⁾ fue calibrado según la expresión siguiente.

$$\ln(PKm_t) = \zeta + \eta_1 \ln(GDP) + \eta_2 \ln(TKm_t) + \eta_3 \ln(MFare_t) + \eta_4 Trend + \eta_5 D_t$$

²⁴ Rivera T., César. Cost – Benefit Analysis of Rail Privatisation. The British Case. Final dissertation for Transport Economics Master Degree. University of Leeds, England. 1998

donde:

PKm = pasajeros-kilómetro en el año i

PIB = Producto interno bruto

TKm = trenes-kilómetro en el año i

Mfare = tarifa promedio

Trend = tendencia en el tiempo

D1 = variable dummy (año de huelga)

Los resultados de la calibración se muestran a continuación.

Cuadro 3.1
Modelo de demanda de transporte de pasajeros

| Modelación de la demanda por el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) | | | | |
|---|---------------------|-------------------|----------|---------------|
| Periodo 1972 a 1995 | | | | |
| Variable | Coefficiente | Error std. | t | t-prob |
| <i>Constant</i> | -5.0836 | 0.98798 | -5.145 | 0.0001 |
| <i>LnPIB</i> | 1.6410 | 0.20908 | 7.848 | 0.0000 |
| <i>LnTKm_t</i> | 1.0730 | 0.10819 | 9.918 | 0.0000 |
| <i>LnMFare_t</i> | -0.9431 | 0.13090 | -7.205 | 0.0000 |
| <i>Trend</i> | -0.0244 | 0.00394 | -6.210 | 0.0000 |
| <i>D1</i> | -0.0598 | 0.03337 | -1.794 | 0.0897 |

R² = 0.902162 F(5, 18)= 33.195 [0.0000] ω=0.024251 DW= 2.04
RSS = 0.01058610738
Se consideraron 6 variables y 24 observaciones

Para los lectores interesados en esta técnica, se ofrece un ejemplo más detallado de modelos de este tipo en la sección 3.5 de este mismo capítulo.

3.3 Programación lineal

Como su nombre lo indica, bajo este método se intentaría resolver el conocido como “problema de transporte”, que queda definido de la siguiente manera.

Se tienen n orígenes y m destinos, entre los que se deben realizar ciertos flujos, como muestra la figura 3.1.

Matemáticamente se expresa como sigue:

$$\text{Min. } Z = \sum_y \sum_j C_{ij} X_{ij} \quad \text{minimizar el costo total} \quad (3.8)$$

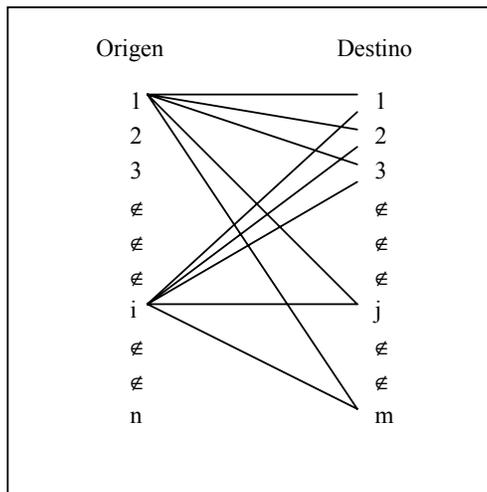
Sujeto a:

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} \geq A_j \quad \text{restricciones de demanda}$$

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq D_j \quad \text{restricciones de disponibilidad}$$

$$X_{ij} \geq 0 \quad \text{condiciones de no negatividad}$$

Figura 3.1
Esquema del “problema de transporte”



Este planteamiento puede leerse como el problema de minimizar los costos totales, de desplazar ciertas cantidades de carga o pasajeros de los orígenes a los destinos deseados (multiplicando cada desplazamiento X_{ij} por su costo C_{ij} y sumando el resultado), pero debiendo satisfacer todas las demandas A_j (mandar al menos lo que se requiere en los destinos) y las disponibilidades D_i (mandar cuando mucho lo existente en los orígenes). Además, la no-negatividad implica que sólo se aceptan envíos y no regresos.

La solución al problema anterior consiste en encontrar el conjunto de flujos factibles y óptimos, esto es, las X_{ij} que tanto satisfacen todas las restricciones como conllevan al costo mínimo.

Las principales deficiencias del presente método radican en sus supuestos básicos:

1. El producto no siempre es homogéneo. No es lo mismo enviar a cualquier destino; hay lugares que requieren un tipo determinado de producto disponible, sólo en ciertos orígenes. Además, de los orígenes pueden salir varios productos con diferente calidad o características; estas deficiencias pueden eliminarse parcialmente, a través de una creciente complejidad y costo de elaboración del modelo.
2. La optimización (matemática) puede estar en contra del desempeño económico; por ejemplo, el mismo supuesto de homogeneidad, incluso también provoca que en la realidad se observen envíos que el modelo indicaría como "negativos" (en el sentido teórico). Evidentemente, lo que sucede en el mundo real no sigue los dictados de una optimización matemática, es diferente de lo que se puede pronosticar. Sin embargo, aunque la optimización puede ser incongruente con la realidad, los resultados son una herramienta insustituible en la toma de decisiones, que deben ser desarrolladas y mejoradas constantemente.

A pesar de estas limitantes, y aún cuando el potencial de uso de este modelo con fines de pronóstico no ha sido suficientemente valorado, tiene enormes potenciales para el conocimiento y tratamiento de la demanda de transporte. En particular, las posibilidades de que nos ofrezca una estimación de los costos de oportunidad de los recursos involucrados en el sistema de transporte no debe menospreciarse. Para los lectores interesados en profundizar en esta temática le recomendamos el libro de Mohktar Bazaraa, "Programación lineal y flujo en redes".

3.4 Simulaciones con la matriz insumo-producto

La descripción de la matriz insumo-producto que se realiza en el presente trabajo, se ha basado en diversos documentos publicados por la hoy extinta Secretaría de Programación y Presupuesto, y se han hecho algunas explicaciones e interpretaciones de la naturaleza de la matriz y sus usos.

3.4.1 Descripción general

La Matriz de Insumo-Producto es un cuadro o arreglo que presenta las relaciones interindustriales (o intersectoriales, si se identifica a una industria con un sector) de un país o región en un periodo determinado, por ejemplo, el año 1980.

Se entiende por relaciones interindustriales a las compras y ventas que los diferentes sectores de la economía realizan unos con otros, por ejemplo, el sector agrícola vende productos al sector ganadero, o a diferentes sectores industriales (alimentos, tejidos, etc); igualmente, el sector agrícola compra productos de algunos sectores industriales (por ejemplo, maquinaria, fertilizantes, etc). También, las compras y ventas pueden darse dentro del propio sector, o sea el sector agrícola le compra semillas al mismo sector agrícola.

Si existen n sectores, estas relaciones intersectoriales se pueden representar en una matriz cuadrada de dimensión $n \times n$ (A_{ij}) donde el típico elemento A_{ij} representa las ventas que hace el sector i al sector j , o similarmente las compras que hace el sector j al sector i .

Sería ideal que se pudieran tener tantos sectores como bienes existen en la economía (bajo el supuesto de que no hay producción conjunta); sin embargo, eso implicaría un alto costo en la obtención de la información, y haría imposible el manejo de las matrices (por ejemplo, habría que trabajar con matrices del orden de, por decir algo, cien mil por cien mil). Lo que se hace en la práctica es agregar a las industrias para formar sectores, por ejemplo, sector agropecuario en lugar de la industria del maíz, del trigo, etc. De este modo, tenemos interrelación entre sectores, los cuales se pueden identificar como industrias "agregadas", a diferencia de las simples.

Pero aún cuando se habla exclusivamente de sectores, queda todavía ambiguo el número de estos, ya que esa cantidad depende del nivel de agregación. El número de sectores, o nivel de agregación se determina de acuerdo con los censos industriales y con lo que se considera, puede ser un tamaño de matriz manejable (por supuesto, también entran en juego cuestiones de costo). En México, el número de sectores fue de 72 para las últimas matrices (70, 75 y 80).

De este modo, la matriz de relaciones inter-sectoriales es para México de 72 x 72. Hay que hacer notar que las entradas de la citada matriz representan valores, no unidades físicas; esto es, se contabiliza el valor de las ventas o compras, es decir, precio por cantidad. De otra manera, no se podría agregar bienes diferentes; por ejemplo, cómo expresar el total de ventas del sector agrícola cuando éste consiste en maíz, trigo, jitomate, etc. Esto es importante cuando se quieren hacer comparaciones, es decir, cómo se afirma si el producto agrícola es mayor en una situación o en otra.

Para obtener la matriz de insumo en forma completa, sólo se requiere considerar algunas otras relaciones económicas; por ejemplo, cuando se considera un renglón de la matriz (A_{ij}), esto es, $A_{i.}$, se estima el vector de dimensión n , que representa todas las ventas que hace el sector i a los demás sectores, incluyendo al mismo sector i . Sin embargo, algunas de las ventas que hace el sector i no son solamente "insumos" para otras industrias, sino que parte de estas ventas son para el consumo final: por ejemplo, de la producción del jitomate una parte es insumo para la producción de "salsa", pero otra se consume directamente, esto es, ya no se utiliza como insumo para otra industria.

De este modo, para completar o considerar toda la producción del sector i se debe tomar en cuenta no sólo las ventas a otras industrias, sino también las ventas dirigidas al consumo final. El consumo final, o como se le llama comúnmente, demanda final, consta principalmente de cinco componentes: consumo privado, consumo del Gobierno, formación bruta de capital fijo, variación de existencias y exportaciones. De este modo, al renglón A_i se le agregan otros cinco componentes que conforman la demanda final; la suma de todos los componentes de este renglón "aumentado" constituye la producción total del sector i , o más comúnmente, el valor bruto de la producción. Estos mismos componentes de la demanda final se agregan para cada uno de los n sectores.

Con esto se tiene el lado de las ventas o ingreso para los n sectores. Por el lado de las compras o costo hay una típica columna $A_{.j}$ de la matriz (A_{ij}) representa el vector de compras que hace el sector j a los n sectores (incluyendo el mismo sector j); sin embargo, las compras que hace el sector j a todos los demás sectores no representa el total del sector j , ya que aparte de los insumos producidos, esto es, los que provienen de otras industrias existen los llamados insumos primarios, los cuales no son producidos por las otras industrias (elementos típicos de éstos son la mano de obra, la tierra, el capital), y se remuneran o compran con salarios, sueldos, renta y ganancias (además, hay que incluir los impuestos indirectos menos subsidios).

Si en las transacciones entre sectores representados por la matriz (A_{ij}) sólo se consideraron los productos producidos domésticamente, entonces se debe considerar las importaciones como otro de los insumos primarios, es decir, los bienes importados no son producidos por ninguno de los n sectores en que se dividió la Economía. Por ahora se va a hacer referencia a esta versión de la matriz de insumo-producto, esto es, cuando consideramos las importaciones como

insumo primario (una interpretación de esto se verá adelante). Entonces, por el lado del costo o compras se tienen todas las adquisiciones que hace el sector j de los demás sectores. Si a esto se le agregan las importaciones que hace este sector, y el valor agregado (sueldos, salarios, renta, ganancias e impuestos indirectos menos subsidios) se obtiene el total de "compras", el cual es igual al total de "ventas" del mismo sector, esto es, el valor bruto de la producción.

3.4.2 Expresión matemática de la matriz insumo-producto

Con todo lo anterior se expresa la matriz de insumo-producto de la siguiente manera:

$$\left(\begin{array}{c|c} (A_{ij}) & B \\ \hline C & D \end{array} \right) \quad (3.9)$$

Donde (A_{ij}) es la matriz de dimensión $n \times n$ que representa los flujos intersectoriales; B es la matriz de $n \times p$ como la demanda final para cada uno de los n sectores; p es el número de componentes de la demanda final; C la matriz de $l \times n$ que representa todos los requerimientos que tienen los diferentes componentes de la demanda final de insumos primarios; por ejemplo, algunos componentes del consumo privado o de la inversión son importados.

Ahora bien, supóngase que dividimos cada columna de la matriz

$$\left| \begin{array}{c} (A_{ij}) \\ \hline C_{lj} \end{array} \right| \quad (3.10)$$

Por el valor bruto de la producción de esa columna, en este caso obtendríamos una matriz de coeficientes

$$\left| \begin{array}{c} (a_{ij}) \\ \hline c_{lj} \end{array} \right| \quad (3.11)$$

donde:

$$(a_{ij}) = A_{ij}/X_j, \quad c_{lj} = C_{lj}/X_j, \quad y$$

$$X_j = \sum_{i=1}^n A_{ij} + \sum_{l=1}^L C_{lj} = \text{valor bruto de la producción}$$

De este modo, el coeficiente típico a_{ij} se interpreta como el valor de la mercancía i necesaria para producir un peso de la mercancía j (o a la unidad de valor que se esté considerando); la interpretación del coeficiente c_{lj} es similar. De esta manera, se tiene una matriz de requisitos para todos los insumos, sean o no producidos en el país.

Ahora considérese sólo una parte de esta matriz de requerimientos, o sea la matriz (a_{ij}) y denotémosla como A . Esta matriz de coeficientes es por construcción una matriz cuadrada de $n \times n$ donde sus elementos son no-negativos (esto porque las ventas entre sectores son positivas o cero) y es no-nula (se supone que se llevan a cabo ciertas transacciones).

Se quisiera saber el total de insumos vendidos (o productos vendidos a otros sectores) por cada uno de los sectores se tendría que calcular el producto matricial AX , donde X es el vector de dimensión $n \times 1$, que consiste en el valor bruto de la producción, o sea el total de insumos vendidos por la industria i es igual a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} X_j = \sum_{l=1}^n A_{il} X_l \quad (3.12)$$

Si a esto se le agrega la demanda final para el sector i , por ejemplo, y_i , se obtiene el valor bruto de la producción:

$$X_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} X_j + y_i \quad \text{o, en forma matricial}$$

$$\begin{pmatrix} X \\ nx1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ nxn \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ nx1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Y \\ nx1 \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Si se conociera de antemano la tecnología dada por la matriz de coeficientes A y el vector de demanda final "Y", se podría obtener el valor bruto de la producción, para los n sectores, de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} I X - A X &= Y && \text{donde } I \text{ es la matriz identidad de dimensión } n \times n, \\ (I - A) X &= Y \\ X &= (I - A)^{-1} Y \end{aligned} \tag{3.14}$$

Se supone que $(I - A)^{-1}$ existe.

La matriz $(I - A)^{-1}$, también llamada "la inversa de Leontief", se puede interpretar (como se verá), como la matriz de coeficientes directos e indirectos (a diferencia de la matriz A , la cual sólo incluye los efectos directos).

Una vez obtenido el vector X es factible lograr los requerimientos de insumos primarios de la siguiente manera (igual que en el caso anterior, la matriz de coeficientes de insumos primarios debe ser dada o conocida).

$$W | \begin{matrix} n \\ j \end{matrix} C | \begin{matrix} n \\ j \end{matrix} c | \begin{matrix} n \\ j \end{matrix} l \times y$$

O, en forma matricial

$$\begin{matrix} W \\ (lx1) \end{matrix} | \begin{matrix} \Gamma \\ (lxn) \end{matrix} \begin{matrix} X \\ (nx1) \end{matrix} \tag{3.15}$$

donde:

$$\Gamma = (c_{lj}) , y$$

W es el vector de insumos primarios usados en la producción intermedia (no está incluido el consumo final de insumos primarios).

Para completar la demanda de insumos primarios, necesitamos usar alguna información sobre la utilización de insumos primarios en la demanda final; en este sentido podemos esperar que conozcamos o que nos es dado el vector de demanda final aumentado:

$$\begin{matrix} Y \\ V \end{matrix} | \begin{matrix} n \\ 2 \end{matrix} 10 \times 1$$

De este modo podemos calcular la totalidad de insumos primarios requeridos con la siguiente expresión.

$$\begin{pmatrix} Z \\ (lx1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I \\ (lxn) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ (nx1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v \\ (lx1) \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

O sea que, al conocer la tecnología dada por las matrices A y el anterior vector de demanda final, se pueden obtener los totales de la producción para los n sectores y los totales de demanda de insumos primarios.

Volviendo a la inversa de Leontief, se puede interpretar como la matriz de coeficientes directos e indirectos, por ejemplo, si denota el elemento típico de $(I-A)^{-1}$ como S_{ij} , entonces S_{ij} es la cantidad (valor) total que se requiere de la industria i para producir una unidad de valor de demanda final de la industria j . Hay que hacer notar la diferencia entre los números S_{ij} y A_{ij} .

Por ejemplo, si se desea aumentar en una unidad la demanda final para el sector j , se necesita una unidad del bien o sector j ; sin embargo, para producir esta unidad se requiere una serie de insumos dados por el vector columna $a.j^*$, en especial a_{ij} unidades de valor del sector i , pero para generar A_{ij} necesitamos $a_{ij} a.i$ insumos o para producir $a.j$ necesitamos $Aa.j^{**}$ insumos; y también para lograr $Aa.j$ se necesitan $AAa.j = A^2a.j^{**}$ insumos, y así sucesivamente hasta que el proceso converja (el superíndice $*$ denota efecto directo. mientras que el superíndice $**$ señala efecto indirecto). Cuando converge, se tiene que el resultado es el total de insumos requeridos para producir una unidad de demanda final del sector j de manera directa e indirecta.

Para la totalidad de sectores se puede ver lo siguiente:

$$\begin{pmatrix} I \\ I - A \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \dots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \end{pmatrix} \leftarrow A^m \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \dots \end{pmatrix} + O \quad (3.17)$$

Lo cual es común, pues los elementos de la matriz A son o cero o positivos, pero muy pequeños (mucho menores a la unidad). Entonces, la serie infinita $I+A+A^2+\dots+$ constituye la matriz de efectos directos, dada por la matriz identidad, e indirectos, por la secuencia A (primera vuelta de efectos indirectos) + A^2 (segunda vuelta de efectos indirectos) + A^3 (tercera, etc) +...

El ejemplo que se había tomado antes se expresa así: supóngase que se tiene la siguiente estructura de demanda final:

$$e_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{1 en la posición } j\text{-ésima}$$

Entonces,

$$\begin{aligned} X &= (I - A)^{-1} e_j = [I + A + A^2 + A^3 + \dots] e_j \\ &= e_j + a.j + Aa.j + A^2a.j + A^3a.j + \dots \end{aligned} \quad (3.18)$$

Que es el resultado anterior. Si en lugar del vector e_j se tiene cualquier vector (no-negativo) de demanda final y , la expresión $X = (I-A)^{-1} Y$ da el total de insumos (producidos a diferencia de los primarios) que se requieren de manera directa o indirecta para el vector de demanda final Y .

3.4.3 Deficiencias o críticas

Aun cuando tiene un gran potencial teórico y puede dar algunas guías para la toma de decisiones, la técnica de insumo-producto tiene tres importantes limitantes:

1. Pronostica el comportamiento en cantidades, no en precios. Esto es importante porque al simular un cambio en la economía, los ajustes se dan en ambas variables: los precios no permanecen fijos o proporcionales.
2. Maneja sectores, no regiones. Si se considera que el transporte es un fenómeno esencialmente espacial y que la demanda se mide mejor en toneladas-kilómetro o pasajeros-kilómetro (y no en los flujos monetarios entre el sector transporte y los otros sectores), existe la necesidad de transformar la demanda estimada en valor agregado en toda la economía hacia alguna unidad de demanda, localizada geográficamente; por ejemplo, en (Islas, 1990) se resolvió la función: $VBT = f(\text{ton-km})$.
3. La proporción de insumos es constante (fija) y determinística; en otras palabras, se asume que las tecnologías de producción son constantes y conocidas. Este supuesto es, dentro de un contexto de frecuente cambio tecnológico y de incertidumbre, difícil de aceptar.

No obstante, algunas recientes mejoras del método, o su uso combinado con otras técnicas, hacen que se le considere como una de las mejores opciones por su relativamente bajo costo y simplicidad.

3.5 Un modelo de demanda de transporte ferroviario de pasajeros por medio del análisis de regresión

3.5.1 Análisis de los datos

Los datos originales

Los datos usados para el ejercicio que se muestra en este anexo corresponden a una base de datos real. Se trata de la estadística del volumen de pasajeros en cada uno de los 130 periodos de cuatro semanas (por lo que cada periodo constituye un caso) de una empresa ferroviaria que opera en el área de Yorkshire, en el Reino Unido. A pesar de ser un caso real,²⁵ no será suministrada más información de la aquí contenida, por razones de confidencialidad.

Específicamente, las variables que fueron probadas para ser eventualmente incluidas en el modelo fueron las siguientes: el número del periodo (i.e. del “caso”), la cantidad de viajes hechos en cada periodo, la cantidad de viajes hechos en el periodo anterior (lo que se conoce en la literatura de econometría como “variable rezagada”, por lo que se denominarán como “viajes rezagados” y se identificarán como “VIAJ-REZ”), la tarifa por pasajero pagada en términos reales, el producto interno bruto de la región (“PIB”) en términos reales, un índice de los precios reales de la gasolina (como variable “proxy” del precio de la competencia del ferrocarril: el auto particular o el autobús, en adelante referida como “IPG”), doce variables “dummy” (una para cada periodo específico en el año) y algunas dummy adicionales incluidas por las razones que se exponen en la siguiente sección.

Correcciones

Como marca la metodología tradicional en la elaboración de un modelo matemático, el primer paso para analizar la información es la revisión de las gráficas del comportamiento de las variables.

La primera variable a revisar es, por supuesto, la variable dependiente, esto es, los viajes totales que se presentan en cada uno de los 130 periodos, ordenados en forma cronológica. De una inspección visual de dicha gráfica, parece claro que algunos periodos tenían algún problema importante ya que presentaban una variación no congruente con la tendencia observada en los periodos anteriores o subsecuentes. Tales periodos fueron los siguientes: 14, 15, 19, 20, 39, 65, 66, 78, 79, 91, 92, 118, 119, 124, 125, 130, y 131.

Sin embargo, el origen de los problemas era muy diverso. Así, para los periodos 19, 20, 39, 65, 66, 78, 79, 91, 92, 130, y 131, el problema radicaba en la falta de

²⁵ El ejercicio se hizo como parte de los estudios que uno de los autores del presente trabajo llevó a cabo durante la realización de la Maestría en Economía en la Universidad de Leeds, en 1990.

homogeneidad en el método de captura de la información, puesto que ésta se registraba por encima o por debajo de las cuatro semanas que se supone que integraban cada periodo. Entonces, conociendo cuantas semanas habían sido consideradas realmente en el registro de la información, los datos correspondientes al volumen de pasajeros transportados fue multiplicada, respectivamente, por 0.8, 1.33, 0.8, 0.8, 1.33, 0.8, 1.33, 0.8, 1.33, 0.8, y 4, con lo que ya se contaría con datos correspondientes a la demanda en periodos comparables.

En el caso de los periodos 14, 15, 118, 119, 124, y 125, la fuente del problema fue diferente: así, mientras que los periodos 14 y 15 tenían semanas laborables con tres días en vacaciones, los otros periodos presentaron eventualidades como huelgas que distorsionaron el patrón normal de comportamiento de la demanda. Así, para estos seis periodos se usaron seis variables “dummy” etiquetadas en forma específica para cada periodo. Así, al tener valor de uno si se presenta el evento (por ejemplo, una huelga de cierta cantidad de días) o cero en el resto de los periodos que no tuvieron ese evento, se trató de capturar el efecto específico que dichos eventos pueden tener en la demanda.

Por otra parte, la revisión de las gráficas del comportamiento tendencial correspondiente a las variables explicativas (tarifas, PIB y precio de la gasolina o IPG), no muestra evidencias de errores o valores fuera de las tendencias.

3.5.2 Las variables

Aunque las variables que pueden ser usadas para calibrar el modelo dependen realmente de la disponibilidad de información con la que se cuenta en cada estudio en particular, hay algunas posibilidades de seleccionar a aquellas que deben estar de entre la gran cantidad de opciones que usualmente se tienen. Un primer paso para determinar la conveniencia de la inclusión en el modelo de cada una de las principales variables (esto es, “Tarifas”, “PIB”, “IPG”), estas fueron incluidas como variables independientes (esto es, en el eje de las abscisas) en la misma gráfica que tiene como ordenada o variable dependiente a la cantidad de viajes demandados en cada periodo. Aunque no completamente, las variaciones observadas en las variables parecen afectar el comportamiento tendencial de la variable en estudio: la demanda de viajes. Las tarifas y el precio de la gasolina muestran un comportamiento contrario a la forma como cambian los viajes pero el PIB muestra una relación mas fuerte con los cambios en la demanda. Así, es posible concluir que hay algún grado de relación de estas variables explicativas con la variable explicada, esto es con los viajes.

Para tener una idea del tipo de relación que existe específicamente (esto es, lineal, exponencial, etc.) entre las variables explicativas y los viajes demandados, también fueron elaboradas las gráficas de cada una de ellas y los viajes demandados, pero ahora en una gráfica cartesiana típica (con X como la variable explicativa y Y como la variable explicada). No se encontró alguna relación

especialmente clara, por lo que se optará por asumir que las variables ejercen su efecto en dos formas simple, esto es, lineal, y exponencial. Por esta última razón, la base de datos, ya con las transformaciones documentadas anteriormente, aumentó con una serie adicional de variables que son resultado de calcular los logaritmos de las variables originales (“VIAJES”, “VIAJ-REZ”, “TARIFAS”, “PIB” y “IPG”).

De hecho, para proseguir con la labor de selección de las variables mas significativas para su eventual inclusión en el modelo, se elaboró la matriz de correlación parcial entre las variables (usando el paquete estadístico SPSS) lo cual nos permite detectar el grado de explicación que cada variable independiente tiene sobre la variable dependiente (i.e., los viajes).

De la observación de dicha matriz es posible concluir que la única variable que parece no tener una relación estadística relevante (esto es, un coeficiente de correlación mayor o igual a 0.7) con los viajes es la tarifa (“TARIFAS”). Tomando en cuenta que este es un hallazgo bastante contrario a la teoría tradicional, la inclusión de dicha variable en el modelo deberá ser cuidadosamente analizada.

3.5.3 Especificación del modelo

En realidad se intentó calibrar varios tipos de estructura del modelo. La estructura mas simple, lineal tanto en la variable dependiente como en las explicativas fue la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{VIAJES} = & \beta_1 + \beta_2 (\text{VIAJ-REZ}) + \beta_3 (\text{TARIFAS}) + \beta_4 (\text{PIB}) \\ & + \beta_5 (\text{IPG}) + \sum_j \beta_j (\text{dummy})_j + e \end{aligned} \quad (3.19)$$

donde:

VIAJES = la cantidad de viajes regsitrados en cada periodo,

VIAJ-REZ = la cantidad de viajes registrados en el periodo anterior,

TARIFAS = la tarifa por pasajero pagada en promedio, en términos reales,

PIB = el producto interno bruto de la región (“Gross Domestic Product”) en términos reales

IPG = un índice de los precios reales de la gasolina, como variable “proxy” del precio de la competencia del ferrocarril: el auto particular o el autobús,

Dummy j-ésima = doce variables “dummy” (una para cada periodo específico en el año) y seis variables dummy adicionales incluidas por razones específicas.

Otra estructura, que considera un efecto exponencial de las variables independientes sobre la dependiente (modelo LOG-LIN), fue la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} = & \beta_1 + \beta_2 (\text{VIAJ-REZ}) + \beta_3 (\text{TARIFAS}) + \beta_4 (\text{PIB}) \\ & + \beta_5 (\text{IPG}) + \sum_j \beta_j (\text{dummy})_j + e \end{aligned} \quad (3.20)$$

Por supuesto, otra posibilidad es el modelo que considera logaritmos en ambos lados de la igualdad, pero sin variables “rezagadas”, como sigue:

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} = & \beta_1 + \beta_2 (\text{LN(TARIFAS)}) + \beta_3 (\text{LN(PIB)}) + \\ & + \beta_4 (\text{LN(IPG)}) + \sum_j \beta_j (\text{dummy})_j + e \end{aligned} \quad (3.21)$$

Para conocer el efecto que pueden tener las variables rezagadas en la cantidad de viajes de cada periodo, se incluyó la variable “VIAJ-REZ” (para indicar los “viajes rezagados”, esto es, los viajes del periodo anterior) en el modelo log-log, como se muestra a continuación.

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} = & \beta_1 + \beta_2 (\text{LN(VIAJ-REZ)}) + \beta_3 (\text{LN(TARIFAS)}) \\ & + \beta_4 (\text{LN(PIB)}) + \beta_5 (\text{LN(IPG)}) + \\ & + \sum_j \beta_j (\text{dummy})_j + e \end{aligned} \quad (3.22)$$

Como es evidente, la expresión anterior era originalmente (esto es, antes de aplicar logaritmos), como sigue:

$$\begin{aligned} \text{VIAJES} = & \beta_1 (\text{VIAJ-REZ}^{\beta_2}) (\text{TARIFAS}^{\beta_3}) (\text{PIB}^{\beta_4}) \\ & (\text{IPG}^{\beta_5}) (\exp(\sum_j \beta_j \text{dummy}_j)) e \end{aligned} \quad (3.23)$$

Este modelo nos proporciona directamente las elasticidades de la demanda de viajes con relación a cada una de las variables independientes. Sin embargo, como señalan Owen y Phillips (1987, p.239), “esta forma particular de la ecuación de la demanda implica que todas esas elasticidades con respecto a la demanda de viajes son constantes”. Otra ventaja del modelo es que vuelve muy probable la reducción de problemas de heteroscedasticidad (Gujarati, 1988, p. 340), lo cual será analizado en la sección 3.5.5.

Finalmente, se analizó un modelo calibrado en el tipo log-log, pero con la inclusión de una variable que “capturara” el efecto del paso del tiempo (“time trend variable”) que en este caso fue el número del periodo, esto es, del 1 al 130.

El cuadro 3.2 sintetiza algunos de los resultados más importantes de los modelos que se intentó calibrar.

La significancia de los parámetros y el significado del coeficiente R^2 ajustado, así como de la prueba F son presentados con más detalle en las siguientes secciones de este anexo, pero sólo para el caso del modelo LOG-LOG (con “viajes rezagados” y sin “time trend”). Esto se hace así porque parece ser el mejor modelo, de acuerdo con los resultados que se muestran en el mismo cuadro 3.2. Aunque los coeficientes R^2 son sólo comparables entre modelos con la misma variable dependiente, el modelo LOG-LOG parece tener un mayor atractivo teórico que la versión lineal debido a las ya mencionadas ventajas de las elasticidades directas y la probable reducción de la heteroscedasticidad.

Cuadro 3.2
Comparación de las estructuras de modelos

| Modelo | R^2 ajustada | Prueba F | Comentarios |
|------------------------|----------------|----------|---|
| LIN-LIN | 0.8391 | 31.58 | Todas las variables importantes tienen parámetros significativos y signos correctos pero la constante no es significativa |
| LOG-LIN | 0.8526 | 34.94 | Todas las variables importantes tienen parámetros significativos y signos correctos |
| LOG-LOG sin “VIAJ-REZ” | 0.5881 | 9.77 | Todas las variables importantes tienen parámetros significativos y signos correctos |
| LOG-LOG con “VIAJ-REZ” | 0.8612 | 37.39 | Todas las variables importantes tienen parámetros significativos y signos correctos |
| LOG-LOG con time-trend | 0.8602 | 35.52 | El parámetro “time-trend” y la constante no son significativos |

No obstante, debemos ser cautelosos con el supuesto de las elasticidades constantes que podrían no ser válidas para la situación que se tiene en análisis. Si ese supuesto se cumpliera, el actual ejercicio de calibración mostraría que la inclusión de la variable “viajes rezagados” incrementa el ajuste del modelo. Finalmente, cabe señalar que la inclusión de la variable “time trend” no solo no agregaría capacidad explicativa al modelo, sino al contrario, provoca que la constante (esto es, la ordenada al origen) sea no significativa, y se reduce R^2 y F.

En suma, la estructura de modelo mas útil parece ser la representada por las ecuaciones 3.22 ó 3.23, descritas anteriormente.

3.5.4 Las pruebas de significancia

Como se mencionó anteriormente, sólo para el caso del modelo LOG-LOG con variable rezagada se describirán las pruebas de significancia.

Pruebas t

Como ha sido señalado por Gujarati (1988), bajo el supuesto de normalidad, la variable t de la siguiente expresión sigue la distribución t de Student con N - k grados de libertad.

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{se(\beta_i)} \quad (3.24)$$

donde:

t = t calculada,

$\hat{\beta}_i$ = estimadores (ELIO) de los coeficientes de regresión parcial reales

β_i = coeficientes de regresión parcial reales

se (β_i) = error estándar de la estimación de β_i

Como se sabe, esta prueba es en relación con las hipótesis:

$$\text{Nula: } \beta_i = \beta_i^* \quad (3.25)$$

$$\text{Alternativa: } \beta_i \neq \beta_i^* \\ \text{(dos colas)}$$

donde:

β_i = coeficientes de regresión parcial reales

β_i^* = valor de la estimación de β_i , obtenido de la corrida de calibración del modelo.

Con los valores reportados por la corrida de la computadora (se usó el paquete SPSS) fueron calculados los valores de t para cada uno de los parámetros a estimar, considerando el caso especial de que $\beta_i^* = 0$. De las tablas estadísticas de la distribución t de student, se tiene que a un 5% de nivel de significancia y con $(130 - 23 = 107)$ grados de libertad las t calculadas deben ser igual o mayores que (+/-) 1.985, para aceptar la hipótesis nula.

Al realizar la comparación de los valores calculados de t para cada parámetro con el anterior rango, fue posible observar que todas las variables importantes tienen una t calculada por encima de esa cifra, i.e., son significativas, aunque 11 de las 18 "dummy" no son estadísticamente significativas.

Otra vertiente de análisis importante para la prueba anterior resulta cuando se consideran otros posibles valores para β_i^* . Así, podríamos estar interesados en comparar nuestro resultado con, por ejemplo, una elasticidad de -1 para el caso de las tarifas (esto es, encontrar si hay un mercado inelástico). En realidad, el valor a comparar no es -1 ya que tenemos un modelo en el que la variable explicada aparece también como explicativa con rezago. Así, necesitamos comparar con $(-1(1-0.68419)) = -0.3158$, ya que (0.68419) es el valor del parámetro de viajes rezagados en el modelo calibrado. Entonces, aplicando la ecuación (3.24) tendríamos:

$$\frac{(-0.62351) - (-0.3158)}{(0.15517)} = -1.983$$

Como se puede ver, estamos en el límite de la prueba t, por lo que no podemos rechazar la hipótesis nula, i.e. la elasticidad - precio es aproximadamente igual a la unidad, en términos estadísticos.

Prueba F

El valor F es calculado aplicando la relación siguiente:

$$F = \frac{MSS \text{ of ESS}}{MSS \text{ of RSS}} = \frac{\text{“Mean sum of squares of explained”}}{\text{“Mean sum of squares of residuals”}} \quad (3.26)$$

La cual, bajo el supuesto de normalidad sigue una distribución F con (k-1) y (N-k) grados de libertad (Gujarati, 1988, p. 221).

Similarmente a la prueba t, la prueba F se efectúa con relación a las hipótesis:

$$\text{Nula:} \quad \beta_i = 0 \quad (\text{todos los estimadores son igual a cero}) \quad (3.27)$$

$$\text{Alternativa:} \quad \beta_i \neq \beta_i^* \quad (\text{no todos los estimadores son igual a cero}) \\ (\text{dos colas})$$

Del cuadro de análisis de variancia reportado por la corrida de la computadora (usando el paquete SPSS) fue calculado el valor F que resultó ser 37.39. Comparando este valor con un valor F de tablas estadísticas de la función de distribución F que es de 1.66 (al 5% de nivel de significancia y con 22 y 108 grados de libertad), resulta evidente que debemos rechazar la hipótesis nula, esto es, aceptar la significancia global de los parámetros del modelo.

R², simple y ajustada

Como se mostró anteriormente en el cuadro 3.2, el valor ajustado para R² es realmente muy aceptable (0.861), siendo, en este indicador, el mejor de los modelos analizados. Esto significa que 86.1% de la variación de los valores de la variable dependiente (los viajes, o sea, “Viajes”) es explicada por las variables independientes incluidas en el modelo.

3.5.5 Las pruebas de violación de supuestos

Esta es una parte muy importante del ejercicio. Consiste en verificar que los supuestos de la regresión que se realiza aplicando el método de mínimos cuadrados ordinarios (“OLS regression”) están cumpliéndose en el presente caso.

Multicolinealidad

Como se establece en la teoría econométrica, la calibración de modelos lineales múltiples empleando regresión OLS se hace bajo el supuesto de que no hay una

alta correlación (esto es, hay independencia lineal) entre las variables explicativas o independientes.

Para revisar si este supuesto es válido en el modelo que se está seleccionando como el mejor, se analizaron los datos de la matriz de correlación. Así, es posible encontrar en dicha matriz que no había una correlación significativa entre las variables incluidas en el modelo LOG-LOG. Más aún, analizando el signo de los parámetros del modelo calibrado, es posible observar que sólo "Oil-price" (esto es, el precio de la gasolina) tiene un signo contrario a la teoría: un signo negativo que significa que un incremento en el precio de la gasolina causaría una disminución en la demanda del servicio de pasajeros por ferrocarril, lo cual es evidentemente contrario a las relaciones que, intuitivamente, se pensaría que existe entre estas variables. Sin embargo, los parámetros son consistentemente significativos, tanto individualmente (pruebas t) como globalmente (prueba F y R^2). Así, aunque existe una sospecha de multicolinealidad, no hay certeza de ello y no podríamos rechazar el supuesto de independencia de las variables explicativas. No obstante, hay que reconocer que no se intentaron otras pruebas más complicadas como las que recomiendan Gujarati o algunos otros autores clásicos de econometría.

Heteroscedasticidad

Aunque nuestro modelo seleccionado fue calibrado en el tipo LOG-LOG, lo cual supone que reduce este tipo de problema, debemos estar completamente seguros de que no hay problemas importantes con el supuesto de que la variancia del error de estimación es constante.

Una primera regla basada en la experiencia que es recomendada por la mayoría de los libros clásicos de la econometría es la observación de la gráfica de los errores de estimación cuadráticos versus los valores pronosticados o simulados para la variable dependiente (usando precisamente los datos de partida de las variables independientes y sustituyéndolas en el modelo calibrado). Al observar dicha gráfica no se encontró ningún patrón o tendencia en la distribución de los errores. También se revisó la gráfica entre los errores de estimación cuadráticos versus los valores de "LogTarifas" (la más importante de las variables explicativas en el modelo). Tampoco ha sido posible detectar alguna clase específica de variación en el error de estimación cuadrático (suponiendo que éste es un estimador de la variancia del error).

Para tener una mayor seguridad, se aplicó la prueba "Goldfeld-Quand" que, como es conocido, aplica dos regresiones que corresponden a dos grupos parciales y separados de datos, ordenados en relación a la variable independiente o explicativa más importante, como lo recomienda Gujarati. En nuestro caso, la variable explicativa más importante es "LogTarifas" por lo que fue seleccionada para dicho reordenamiento del archivo de datos. Después, el archivo fue dividido en dos grupos de 60 casos en cada grupo, siendo excluidos los 10 periodos del

centro de la nueva lista (del 61 al 70). De las corridas de las dos regresiones obtenemos las siguientes sumas de cuadrados de los residuales, para cada grupo.

periodo 1 al 60: RSS = 0.14849

periodo 71 al 130: RSS = 0,25225

Así, tenemos una F calculada de: $0.25225/0.14849 = 1.6987676$

Al 5% de nivel de significancia y con $((130 - 10)/2) - 23 = 37$ grados de libertad, tenemos un valor calculado de F igual a 1.795. Así, observando que el valor calculado de F no es mayor que el valor F de tablas estadísticas, podemos concluir que no podemos rechazar el supuesto de homoscedasticidad. Sin embargo, como el valor de F de tablas estadísticas en realidad fue calculado por interpolación, debemos tomar con cautela la anterior conclusión. Así, el valor calculado de 1.69 debe ser tomado como un caso extremo (aunque al 1% de nivel de significancia, no hay duda para rechazar la heteroscedasticidad). En suma la prueba G no ha resultado realmente una prueba concluyente o definitiva, por lo que se debe intentar alguna otra prueba.

De hecho, se intentó la prueba Park, suponiendo que la relación entre el error de estimación cuadrático y el logaritmo de la tarifa se expresa mediante la siguiente forma (Gujarati, p. 329):

$$\begin{aligned} LN(e^2_i) &= LN \sigma^2 + \beta LN(LogTarifas_i) + v_i \\ &= \alpha + \beta LN(LogTarifas_i) + v_i \end{aligned} \quad (3.28)$$

Es importante notar que ahora lo que estaríamos tratando de encontrar es si β es estadísticamente significativo. Al realizar la regresión, encontramos un valor de $t = 0.934$, el cual esta muy por debajo del valor t de tablas estadísticas (a cualquier nivel de significancia o grados de libertad). Entonces, de esta prueba Park, podemos concluir que no se puede rechazar el supuesto de homoscedasticidad en nuestro modelo.

Finalmente, también se realizó la prueba mas simple de las que recomienda Glejser, realizando una regresión entre el error absoluto y la variable explicativa más importante, esto es, calibrando un modelo como el siguiente:

$$|e_i| = \beta_1 + \beta_2 (logtarifasi) + v_i \quad (3.29)$$

donde:

$|e_i|$ = error absoluto obtenido en cada caso o periodo simulado,

$\log(\text{tarifas})_i$ = logaritmo de la tarifa, que es la variable explicativa más importante en el modelo que se está calibrando,

Nuevamente, de los resultados de la regresión del anterior modelo, podemos concluir que no se encuentran parámetros significativos, lo que implica que no podemos rechazar el supuesto de homoscedasticidad.

Autocorrelación

Tomando en cuenta que los datos usados eran parte de una base registrada en forma de series de tiempo, la probabilidad de encontrar problemas de autocorrelación de errores es muy grande. Por ello, para detectar la posible existencia de autocorrelación de residuales, se analizó, primeramente, la gráfica de dichos errores versus los viajes pronosticados y contra los errores pero rezagados. Dicho examen visual no permite encontrar alguna relación clara entre tales errores. Entonces, se trató de calibrar el siguiente modelo entre los errores y sus correspondientes errores rezagados:

$$(e_t) = \beta_1 + \beta_2 (e_{t-1}) + v_t \quad (3.30)$$

donde:

e_t = error obtenido en cada caso o periodo simulado,

e_{t-1} = error rezagado correspondiente, esto es error que se presentó en la estimación realizada con el periodo anterior.

De los resultados del análisis estadístico del modelo se pudo comprobar que no hay relación estadísticamente significativa entre tales errores.

Sin embargo, quizás sea necesario desarrollar una prueba mas sofisticada. Partiendo del hecho de que se están usando variables rezagadas, no se pueden usar las pruebas tradicionales de Durbin-Watson (Gujarati, p. 376). Así, se aplicó la prueba "Durbin h" (Gujarati, p. 526), calculando el parámetro h según la siguiente relación:

$$h = (1 - (d/2)) ((N/(1-N(\text{var } \alpha_2)))^{**1/2}) \quad (3.31)$$

donde:

d = parámetro Durbin – Watson, obtenido de la corrida de calibración,

N = tamaño de la muestra, en nuestro caso 130,

var α_2 = variancia del coeficiente de la variable rezagada, obtenido de la corrida de calibración.

Dicho valor calculado se compara con los valores correspondientes de una distribución normal (por ejemplo, al 5% de nivel de significancia, $h = 1.96$).

Entonces, substituyendo valores:

$$h = (1 - (2.35934/2)) ((130/(1-130(0.00219)))^{**1/2})$$
$$= -2.4226.$$

Como este valor es menor que -1.96 , no podemos rechazar la hipótesis nula de que hay autocorrelación negativa de primer orden.

El problema es que, por otra parte, el modelo calibrado sin variable rezagada tiene un parámetro Durbin-Watson de 0.61086. Entonces, dicho modelo muestra una clara autocorrelación positiva de residuales. Entonces, una conclusión muy importante del problema actual es que, con la inclusión de la variable rezagada, se corrigió la autocorrelación de residuales que era positiva, pero el efecto fue demasiado grande y se obtuvo una autocorrelación negativa de residuales. En consecuencia, la medida más recomendable para encontrar la causa de la autocorrelación de errores o incluso eliminar dicha autocorrelación es usando el método iterativo Cochrane-Orcut. Sin embargo, dicho método no está siempre disponible en los paquetes estadísticos y ello dificulta su aplicación. Ese fue el caso del presente ejercicio, por lo que se optó por dejar el modelo con el uso de la variable rezagada.

3.5.6 Interpretación económica de resultados

El modelo

De los reportes de la corrida de regresión del modelo y substituyendo en la expresión 3.22, tendríamos el siguiente modelo:

$$LN(VIAJES) = -4.6421 + 0.6842 (LN(VIAJ-REZ)) - 0.6235 (LN(TARIFAS))$$
$$+ 1.2372 (LN(PIB)) - 0.2115 (LN(IPG))$$
$$+ \sum_j \beta_j (dummy)_j + e \quad (3.32)$$

Los parámetros de las variables “dummy” no han sido incluidas en la expresión anterior para no hacerla más difícil de interpretar, esto es, para concentrar el análisis en los parámetros de las variables más importantes.

Usando el modelo anterior y substituyendo la base de datos usada para la calibración hemos obtenido algunos resultados que se pueden comparar en una misma gráfica con los valores de los viajes realmente realizados en cada uno de los 130 periodos del estudio. Dicha gráfica mostró que el modelo realmente daba una estimación muy buena de la tendencia real de dichos viajes. Con ello, el buen

uso del modelo sólo recae en contar ahora con un adecuado pronóstico de las variables independientes.

Además, el hecho de que se haya obtenido una razonablemente alta reproducción del comportamiento de los viajes, nos lleva a afirmar que, como recomiendan Owen y Philips (véase la bibliografía al final del presente documento), es posible usar un modelo con el supuesto de elasticidades constantes, al menos para variaciones no muy grandes en las variables independientes (del orden de las que se presentaron en los datos de partida).

Los parámetros

Aunque ya se cuenta con los valores de los parámetros y el modelo así calibrado parece ser muy útil para fines de pronóstico, dichos valores no son realmente las elasticidades ya que tenemos un mdelo con variable rezagada.

De hecho, retomando la expresión 3.22 tenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} - \beta_2 (\text{LN(VIAJ-REZ)}) &= \beta_1 + \beta_3 (\text{LN(TARIFAS)}) \\ &+ \beta_4 (\text{LN(PIB)}) + \beta_5 (\text{LN(IPG)}) + \\ &+ \sum_j \beta_i (\text{dummy})_j + e. \end{aligned}$$

Y así, asumiendo que, en el largo plazo y conceptualmente VIAJES y VIAJES REZAGADOS son la misma variable, se tiene que:

$$\begin{aligned} (\text{LN (VIAJES)})(1-\beta_2) &= \beta_1 + \beta_3 (\text{LN(TARIFAS)}) \\ &+ \beta_4 (\text{LN(PIB)}) + \beta_5 (\text{LN(IPG)}) + \\ &+ \sum_j \beta_i (\text{dummy})_j + e. \end{aligned}$$

Esto es,

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} &= (\beta_1/1-\beta_2) + (\beta_3/1-\beta_2)(\text{LN(TARIFAS)}) \\ &+ (\beta_4/1-\beta_2)(\text{LN(PIB)}) + (\beta_5/1-\beta_2)(\text{LN(IPG)}) \\ &+ \sum_j (\beta_i/1-\beta_2)(\text{dummy})_j + e. \end{aligned}$$

Entonces, sustituyendo los valores de los parámetros en el modelo originalmente calibrado se tiene lo siguiente:

$$\begin{aligned} \text{LN (VIAJES)} &= -14.69992 -1.9743 (\text{LN(TARIFAS)}) \\ &+ 1.23719 (\text{LN(PIB)}) -0.669675 (\text{LN(IPG)}) \\ &+ \sum_j (\beta_i/1-\beta_2)(\text{dummy})_j + e. \end{aligned}$$

Comparando estos valores de las elasticidades con las que se encuentran en estudios similares o según los planteamientos teóricos, se tienen las siguientes conclusiones.

En una primer revisión de los resultados del modelo en lo que se refiere a las principales variables independientes, se observa que en el actual ejercicio se obtuvo un valor de la elasticidad precio (esto es, con relación a la tarifa) demasiado alto. En el caso del PIB, el valor no es muy grande pero indica una respuesta mas que proporcional en la demanda del transporte. Por otra parte, y como se comentó previamente, se obtuvo una elasticidad también negativa del precio de la gasolina ("IPG") pero el estimador es realmente significativo desde el punto de vista estadístico. Analicemos un poco más detenidamente cada uno de estos resultados.

En el caso de la elasticidad de la tarifa, el valor que se obtiene en el presente ejercicio no sólo indicaría una gran elasticidad de la demanda (indicios de un también muy alto nivel de competencia en el mercado de servicios de transporte correspondiente) sino también está muy por encima de los valores encontrados por Oldfield y Tyler (por dar una referencia casi obligada) en cualquiera de los tipos de boletos analizados por ellos. La misma conclusión aplica para la comparación con el estudio de Jones y otros, o con el estudio de Fowkes y otros (véase la lista de referencia al final de este anexo). Incluso, aunque el valor que encontramos en el modelo originalmente calibrado es muy similar al encontrado por Glaister (-0.62351 versus -0.74) cuando él usa la tarifa pagada en promedio (tal y como lo hicimos en el presente ejercicio), hay que reconocer que dicho autor si bien usó un modelo LOG-LOG no introdujo la variable viajes rezagados ("viajes rezagados"), como si se hizo en el presente modelo. No obstante, es interesante notar que el propio Glaister encontró valores de elasticidad de -2.22 cuando consideró las tarifas más económicas. Finalmente, Owen y Phillips encontraron un valor similar al nuestro en algunas rutas, pero en una estimación de largo plazo.

Por lo que corresponde al PIB, el valor de la elasticidad es de 1.2372, positivo y estadísticamente significativo. Esto significa una alta elasticidad de la demanda de transporte ferroviario de pasajeros en la región del Reino Unido que se estudió. Es decir, en la línea ferroviaria específica de la cual se obtuvieron los datos, la demanda es muy sensible a los incrementos en la actividad económica. Comparándola con los resultados de otros ejercicios similares al que se describe, se puede decir que si bien Jones y otros no encontraron que esta variable fuera estadísticamente significativa, Owen y Phillips en su estudio encontraron un intervalo que va de 0.93 a 1.39 para esta elasticidad. Como se puede observar, el valor que encontramos cae dentro de dicho intervalo.

Por otra parte, el valor de la elasticidad del precio del bien sustituto (el precio de la gasolina, "IPG") en nuestro ejercicio fue de -0.6697. Entonces, aunque esto implica que la respuesta de la demanda es menos que proporcional (un mercado relativamente inelástico), el valor negativo implica que un incremento en el precio de la gasolina habrá de reducir la demanda por el servicio ferroviario de transporte

de pasajeros. Esto es, el transporte de pasajeros por automóvil y por autobús se incrementaría aunque aumentara el precio de la gasolina. Esto no tiene sentido o explicación lógica. En los estudios similares al presente ejercicio tampoco se encontró un resultado concluyente. Así, Owen y Phillips no encontraron algún poder explicativo en dicha variable, mientras que Jones y otros tienen una conclusión similar.

Finalmente, es importante señalar que si bien algunos autores como Glaister, Owen y Phillips encontraron un aceptable nivel de significancia en la variable tendencial ("time trend"), en nuestro ejercicio no encontramos significancia estadística.

4 La movilidad y el problema del transporte

Como se mencionó en la introducción, en este cuarto capítulo se desea proporcionar al lector algunas de las bases teóricas que han intentado explicar el fenómeno del movimiento de personas y cosas en el ámbito urbano e interurbano. Con estas bases se intenta que el lector pueda conocer el estudio central de la movilidad y su aplicación general a los estudios de la demanda de transporte. Aunque el origen de la mayoría de los conceptos e ideas emana del análisis que se ha originado en el ámbito del transporte urbano, su aplicación es en lo general válida para el ámbito interurbano.

4.1 Estructura urbana, teorías de desarrollo urbano y sectorización

En esta sección se busca introducir al lector a algunos temas relativos al desarrollo de las regiones y las ciudades, dada la interrelación entre tal desarrollo y el transporte.

4.1.1 Concepto de ciudad

Como acontece con muchos términos cotidianos, no es fácil tener una definición clara, no ambigua y generalizable, de lo que es una ciudad, urbe o asentamiento urbano. Como señala J. H. Johnson, "el procedimiento usual consiste en definir como "urbano" todo asentamiento que tenga un tamaño, una densidad de población y una estructura de empleo determinados" (principalmente no agrícolas).

En otros casos se define la ciudad con base en la diferenciación espacial; esto es, en la CONCENTRACION de ciertos atributos como son la población, el poder político o económico, servicios, infraestructura, empleo, educación, etcétera. Incluso, existen autores como Nels Anderson para los cuales lo urbano es una actitud, esto es, una capacidad para comportarse individual y colectivamente, que es muy diferente en relación a la actitud rural. Así, no basta que estén ciertas personas habitando una zona "urbana" si su comportamiento no cumple determinados requisitos de convivencia y organización "urbanas".

Es claro que los enfoques anteriores no son excluyentes. Se invita al lector a que intente una definición que integre los enfoques y trate de dar ciertas reglas para clasificar las urbes.

Entre los factores más señalados en relación con la formación de las ciudades se encuentran los siguientes:

- Comunidades sedentarias organizadas para el cultivo de cereales.
- Acumulación de excedentes de alimentos que liberaron personas que se dedicaron a otras actividades, llegando a ser artesanos.
- Motivos religiosos o casuales.

Entre los factores que motivaron la evolución de las ciudades, se tienen los siguientes:

- Comercio. Esto se debe a que las aldeas fueron concentrando alimentos o mercancías, y se convirtieron en el lugar del intercambio con otras comunidades.
- Transporte. El desarrollo del transporte en general, permitió un mayor intercambio entre ciudades haciendo que algunas de ellas explotaran con mayor éxito sus ventajas y se fueran convirtiendo en centros de poder económico en vastas regiones.
- Desarrollo social. Paralelamente a lo anterior, se desarrollaron ciertas instituciones sociales que organizaron la creciente complejidad de las actividades derivadas del comercio, transporte, educación, etcétera. Tales instituciones fueron causa y consecuencia de profundas transformaciones que ensancharon las posibilidades de crecimiento y poder de ciertas ciudades.
- Religión. En algunos casos, las ciudades crecieron dada la concentración de actividades de culto religioso, lo cual coincide en algunas civilizaciones antiguas, con el poder de sacerdotes y la construcción de grandes templos y plazas de adoración a los dioses respectivos.
- Poder político-militar. Algunas ciudades se desarrollaron (o incluso, es posible que surgieran) dada la existencia de fuertes o instalaciones dedicadas a la vigilancia del territorio, o del poder político y militar de los gobernantes.
- Imitación. En algunas civilizaciones, la existencia de una ciudad garantizaba la difusión de las ventajas de la concentración espacial de ciertas actividades y ello actuó como motor para la fundación y desarrollo de otras ciudades.
- Fundación de colonias. La época de expansión imperialista, no concluida aún, motivó la creación de ciudades que garanticen el dominio y explotación de territorio y comunidades ajenos.
- La revolución industrial. Este acontecimiento "liberó", mediante la mecanización de la agricultura, gran cantidad de labriegos que emigraron a las ciudades, donde la misma industrialización creciente los demandaba. Además, mejoraron los transportes, y en general, los medios para organizarse socialmente, lo que conllevó al crecimiento explosivo de algunas ciudades. Es innegable que el automóvil es el más reciente y más poderoso factor de crecimiento de las ciudades.

Los anteriores factores se presentaron en el orden en que se supone fueron apareciendo. Sin embargo, no todos han ejercido el mismo efecto, ni han tomado ese orden, aunque son de gran interés al permitir esbozar ideas que explican el desarrollo urbano.

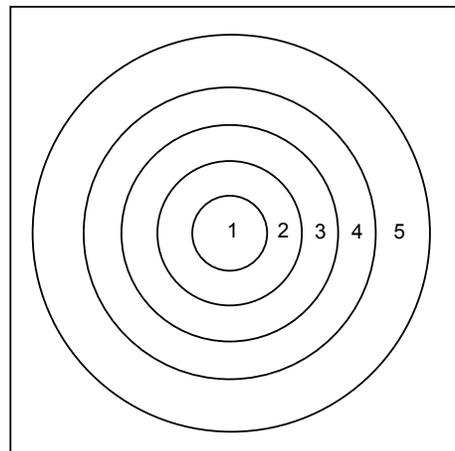
4.1.2 Estructura urbana

En el presente trabajo, se entiende por estructura urbana el conjunto de zonas con diferentes usos del suelo (que se dan dentro del área considerada), así como su interrelación (posición, jerarquía, tamaño, dependencia, etcétera). Por supuesto, existen diferentes teorías que tratan de explicar la formación de las estructuras urbanas, destacando las tres siguientes.

Teoría de la expansión concéntrica

Desarrollada por E. W. Burgess en 1923, se basa en la idea de que las ciudades van creciendo en círculos anulares alrededor de un centro de actividades, formando zonas diferentes; cada una con una función dentro del contexto urbano. Básicamente, se distinguen cinco zonas características: (véase la figura 4.1, donde los números corresponden a la siguiente relación)

Figura 4.1
Expansión concéntrica

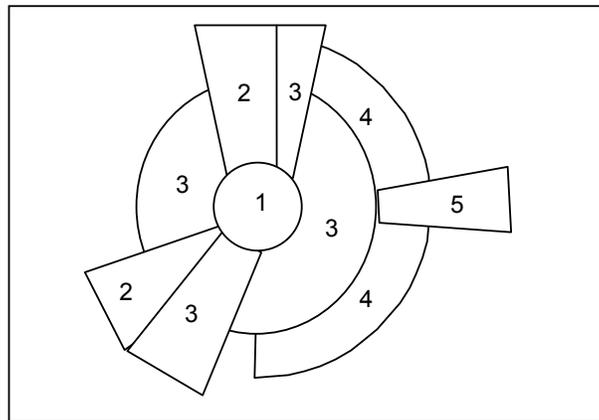


1. La zona central, o centro comercial y de negocios (CBD, por sus iniciales en idioma inglés)
2. Una zona anular de transición
3. Una zona residencial de bajos ingresos
4. Una zona residencial de altos ingresos
5. Una última zona periférica

Teoría sectorial

Creada por Homer Hoyt, esta teoría plantea la posibilidad de que se desarrollen sectores en forma radial a partir del centro o distrito central de negocios (esto es, en forma de “cuñas”), aunque con algunas zonas en forma concéntrica. Así, si bien se proponían tipos de zonas como las propuestas por la teoría concéntrica y también se postulaba un papel predominante del centro se asumía otro tipo de estructura e interrelación entre las zonas de la ciudad (véase la figura 4.2):

Figura 4.2
Teoría sectorial



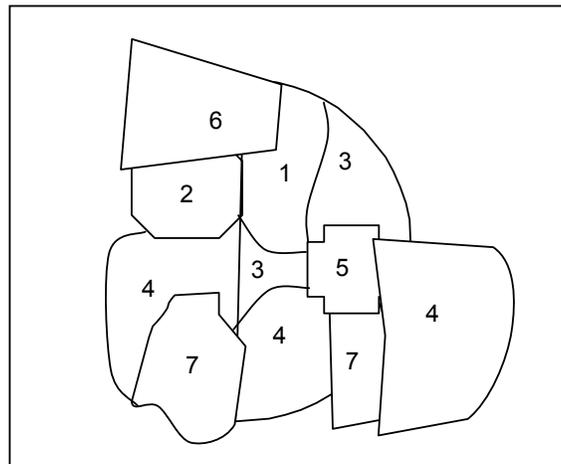
1. El centro comercial y de negocios
2. Una o más zonas de industria ligera y comercios
3. Una o más áreas residenciales de bajos ingresos
4. Areas residenciales de ingresos medios
5. Areas residenciales de ingresos elevados

Como se puede observar, este planteamiento puede ser mas realista y congruente con el hecho de que algunas zonas tienden a crecer a lo largo de las vías de comunicación que llegan hasta el centro de la ciudad. Por ello, esta idea resulta de interés especial en el presente trabajo, pues resalta la importancia que tiene el transporte en la conformación de la estructura urbana y viceversa.

Teoría de expansión multicéntrica

Esta teoría fue desarrollada por C G Harris y E Ullman. Plantea un crecimiento y especialización de ciertas zonas de las ciudades en una forma más bien celular, y distribuida en el área urbana sin un patrón igual para todas las ciudades. Las zonas típicas que propone son muy parecidas a las correspondientes a las otras teorías, pero la idea de la existencia de varios centros comerciales y de negocios y de una estructura menos regular (sobre todo en comparación con la teoría concéntrica) hace de esta teoría mas adecuada para explicar la estructura observable en las ciudades modernas (véase la figura 4.3):

Figura 4.3
Expansión multicéntrica



1. Un centro comercial y de negocios principal
2. Uno o más centros comerciales secundarios
3. Zonas de industria ligera
4. Zonas residenciales de bajo ingreso por persona
5. Zonas residenciales medias
6. Zonas residenciales para habitantes de ingresos altos
7. Zonas de industria media o pesada

4.2 La movilidad regional y urbana

Este es un tema básico para empezar a entender la problemática del transporte. No obstante, es una temática con una gran cantidad de problemas teóricos y metodológicos, que no han sido suficientemente tratados en la literatura técnica. Ello explica por qué los términos asociados a la movilidad regional y urbana se manejan con imprecisión, confusión o desvirtuando los problemas. En ese sentido, la mayoría de los conceptos que se incluyen a continuación, tan sólo representan un primer esfuerzo por esclarecer y ordenar nuestras ideas, y pueden ser revisados y mejorados por los lectores para eliminar las posibles deficiencias.

4.2.1 Conceptos preliminares

1. Viaje.

Es el desplazamiento de una persona asociado a un origen y un destino preestablecidos, y resultante de un propósito determinado.

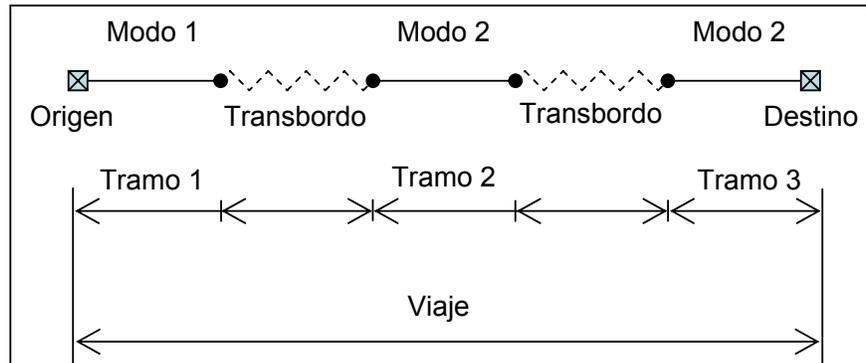
2. Viajes Persona-Día.

Es la cantidad total de viajes que se realizan; es decir, entran o salen de una zona, tomando como periodo el día, y pone énfasis en que no son viajes de vehículos, sino de personas. Debe enfatizarse que el total de VPD que sale de una zona debe ser igual a la cantidad de viajes que entra a la zona en un día, a menos que sea una zona que contenga una terminal foránea o algún otro "polo" especial de viajes no cotidianos.

3. Tramo de viaje.

Es la parte del viaje que se realiza sin cambio en el modo de transporte; esto es, un viaje puede incluir varios transbordos, y entre cada par de transbordos o entre estos y el origen o destino están los tramos (véase la figura 4.4). En este concepto hay dos problemas: primero, ¿los transbordos se pueden considerar tramos? ¿El primer tramo y el último son de caminata a pie? La respuesta a esta pregunta depende del concepto que se tenga de transporte. Esencialmente, los recorridos a pie son un modo de desplazamiento como cualquier otro, y deberían constituir un tramo equiparable a los recorridos a bordo de un vehículo. Sin embargo, en diversos modelos de simulación del comportamiento de los usuarios del transporte, los recorridos a pie no se consideran tramos, por razones de facilidad de calibración y uso de esos modelos (véase el capítulo cinco).

Figura 4.4
Composición de un viaje



4.2.2 Definición de movilidad regional y urbana

Es el fenómeno que consiste en los deseos de viajar de una zona a otra dentro de la región o ciudad, y es resultante de la interacción de las diferentes zonas de dicha región o ciudad. Se expresa en viajes-persona al día.

Sus principales condicionantes son:

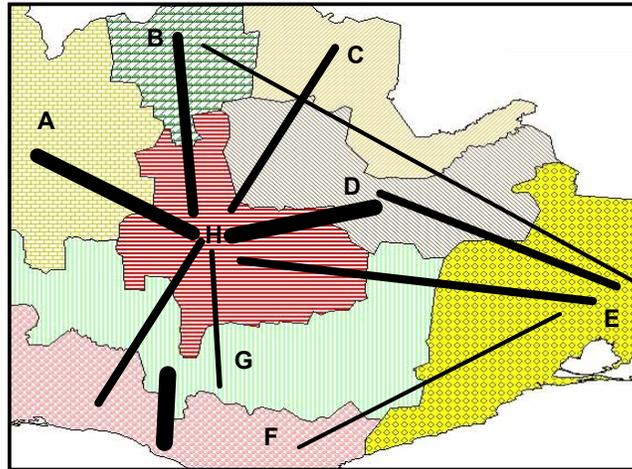
- Ritmo y características de la actividad económica. Se entiende por "ritmo" la tasa de cambio, que en este caso es el crecimiento.
- Tipo y características del uso del suelo.
- Tipo y características de la población residente.

4.2.3 Líneas de deseo

Es el resultado de la convergencia de viajes en cierta parte de la región o ciudad. Esto es, es la coincidencia de cierta cantidad de viajes en horario, dirección y sentido, en tal magnitud que es posible agruparlos en un bloque continuo. Nótese que los viajes de las líneas de deseo pueden tener propósitos y orígenes y destinos diferentes de un día para otro pero, en conjunto, mantener cierta estabilidad en el corto plazo. Ese es su principal virtud y atractivo para empezar a estimar la demanda cotidiana de transporte. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de las líneas de deseo (tomado de un estudio real), construidas bajo el

concepto de volumen de pasajeros que van directamente de cada origen a cada destino. Estas líneas de deseo cumplen totalmente la definición pues representan una agregación de varios movimientos que coinciden en el tiempo y en el espacio.

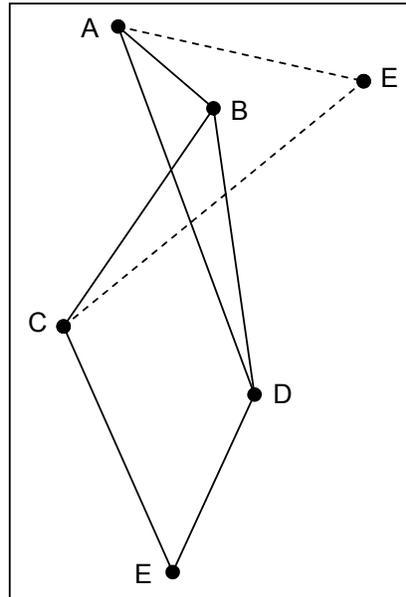
Figura 4.5
Representación de líneas de deseo



No obstante, no siempre este es el caso, pues en muchas ocasiones lo que se quiere obtener realmente es que se agreguen ciertos movimientos origen a destino que no necesariamente coinciden totalmente en la orientación del desplazamiento, aunque podríamos asumir que si hay cierta coincidencia. Para ilustrar el anterior problema metodológico, consideremos la figura 4.6 en la que se muestran orígenes o destinos de ciertos viajes hipotéticos que se desea agregar en la menor cantidad posible de líneas de deseo.

Las líneas continuas representan los viajes que, supuestamente, podrían quedar dentro de cierta línea de deseo. Las líneas punteadas señalan viajes que no quedarían en la línea de deseo por no coincidir con la dirección y sentido de los restantes movimientos. Así, el criterio básico para asignar cierto movimiento de un origen a un destino particular sería el ángulo de desviación de dicho desplazamiento (en línea recta) con relación a la línea principal (por ejemplo, la que une a los dos polos que son los más importantes en cuanto a la generación de viajes en el área que se estudia). Así, podríamos especificar que dicho ángulo no fuera superior a cierto valor. Una variante de este criterio sería que dicho ángulo no implicara recorridos ortogonales que excedan cierto valor (los recorridos que habrían de hacer los usuarios para incorporarse a la línea de deseo).

Figura 4.6
Formación de la línea de deseo



Como se puede observar, no existen criterios totalmente definidos para "construir" las líneas de deseo, quedando mucha subjetividad. Por ello, este es un tema de especial interés en la investigación de la movilidad regional y urbana. Cabe notar que prácticamente la única referencia bibliográfica que ha planteado, aunque parcialmente, al anterior problema es el libro: *Diseño de tráfico y forma urbana*, de Giorgio Boaga (véase la bibliografía).

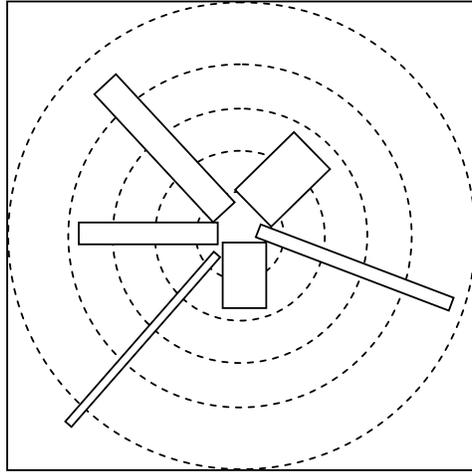
4.2.4 Tipos de movilidad regional y urbana

Para caracterizar la movilidad urbana, se hace referencia a la forma cómo están distribuidas las líneas de deseo dentro del área urbana.

Básicamente, los tipos de movilidad urbana quedan definidos por la estructura urbana, por ejemplo, por la forma como se distribuyen las actividades de la ciudad en las diferentes zonas: por tanto, la movilidad se tipifica (en forma similar a la estructura urbana) en:

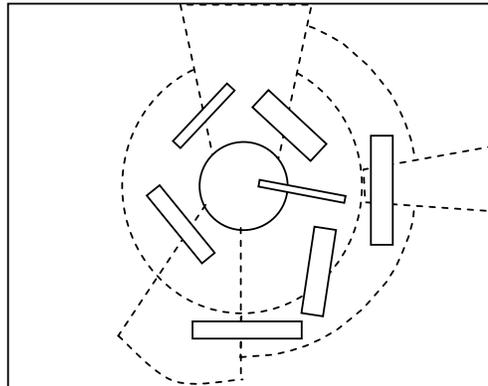
Radial, básicamente asociada a una estructura concéntrica (véase la figura 4.7)
Supuesto: Casi no hay viajes entre los mismos usos del suelo.

Figura 4.7
Movilidad radial



Tangencial, básicamente asociada a una estructura sectorial (véase la figura 4.8). Nótese que existe cierta tendencia a suponer que el patrón de viajes en la Ciudad de México es así, pero aún no se han hecho los estudios que lo puedan comprobar.

Figura 4.8
Movilidad tangencial



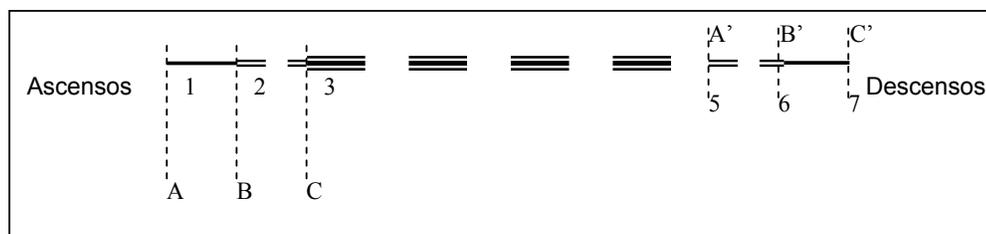
Mixta, asociada a una estructura multicéntrica.

4.3 Demanda y oferta de transporte

Para una mejor comprensión del complejo significado de este fenómeno, es conveniente recordar el concepto de "polígono de carga". Primeramente, se presenta un esquema en el que se ha intentado caracterizar la demanda de viajes a lo largo de la ruta.

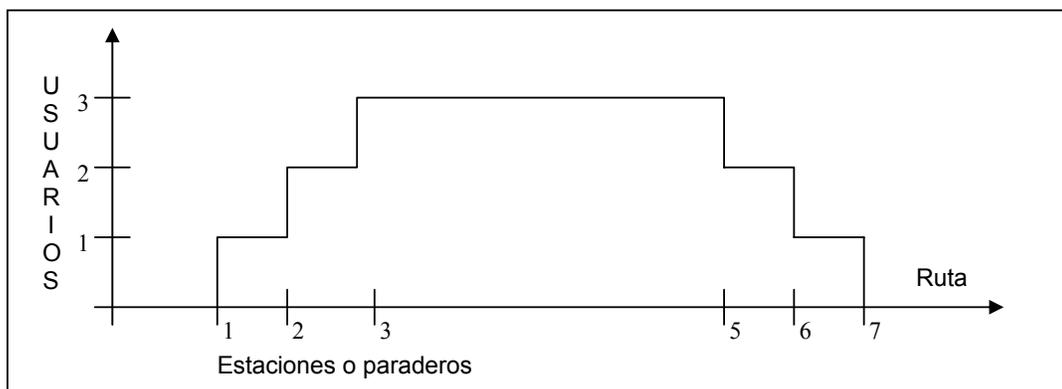
Sean, por ejemplo, tres usuarios que van, respectivamente de los puntos A a A', B a B', y C a C', recorriendo una longitud semejante, según la siguiente figura:

Figura 4.9
Ascenso - Descenso de usuarios



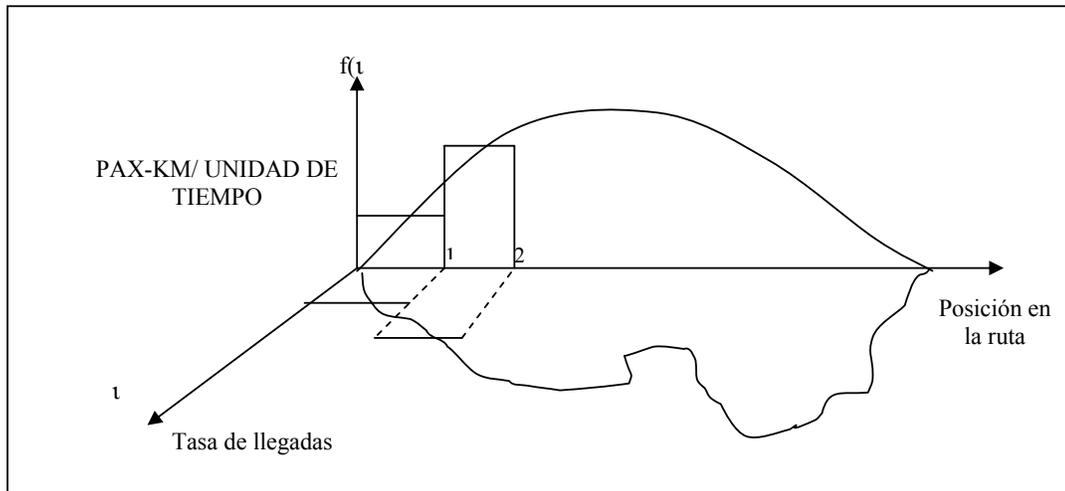
Como se aprecia en la figura 4.9, del punto 1 al punto 2 de la ruta, va un usuario a bordo del vehículo; del 2 al 3 van dos, y así conforme van ascendiendo usuarios; lo inverso de los puntos 5 a 7 en que descienden los usuarios. Trasladando este fenómeno a una gráfica de usuarios dentro del sistema (ruta) contra la posición a lo largo de la ruta, se tiene el polígono de carga (figura 4.10).

Figura 4.10
Polígono de carga



Generalizando el esquema para los usuarios que arriban a la ruta en un período dado, y sin tomar en cuenta por el momento la capacidad del vehículo, habrá que considerar que tales arribos se distribuyen en forma heterogénea pero continua a lo largo de la ruta, es decir, se concentran en unas zonas y son dispersos en otras.

Figura 4.11
Demanda de transporte



El esquema de demanda puede representarse como se ilustra en la figura 4.11. En esa gráfica se ha denotado por $f(t)$ la demanda de transporte, es decir, la altura de la curva de demanda en un punto dado de la ruta, considerando que es una tasa de pasajeros por unidad de distancia y de tiempo, resultado de los orígenes y destinos de los viajes.

La función $f(t)$ es la envolvente (o acumulada 'suavizada') de los pasajeros por unidad de longitud y por unidad de tiempo, por tanto, representa los viajes demandados en un punto determinado (por unidad de tiempo), y varía según la posición (x) de dicho punto en la ruta. Cabe señalar que, como $f(t)$ es la envolvente de los recorridos acumulados de los usuarios, se desprende que el área bajo la curva son pasajeros - kilómetro demandados.

En contrapartida, los pasajeros-kilómetro que ofrece el sistema a lo largo de la ruta se pueden interpretar como sigue: se denota por σ la oferta de transporte, que es constante a lo largo de la ruta si se le considera como una tasa de pasajeros por unidad de distancia y de tiempo ofrecidos, que es directamente proporcional al paso de los vehículos y su capacidad por vehículo, e inversamente al tiempo de recorrido y otras variables que afectan la velocidad de operación realmente ofrecida a los usuarios.

Es oportuno señalar, que una vez planteada la oferta y la demanda de transporte de la anterior manera, se puede aplicar una forma de congestión que pone énfasis en la relación entre la demanda y la oferta de transporte, de la siguiente manera (denotada como A):

$$A = \text{intensidad de uso del sistema}$$

$$= f(t) / \sigma = \text{tasa de demanda} / \text{tasa de oferta}$$

Evidentemente, si $A > 1$, esto es, si la demanda es mayor que la oferta, se tiene congestión en el sistema.

4.4 Los pasajeros transportados

Es muy común encontrar que se use este concepto para describir las características de movilidad de una ciudad, y no es del todo erróneo puesto que se hace referencia, efectivamente, a diversos aspectos de las formas de cómo se movieron las personas. Esto es, da cuenta de un hecho consumado; entonces, para diferenciarlo del concepto de movilidad que se está manejando que es en términos de deseos o intenciones de moverse, podría intentarse una propuesta en los siguientes términos, apoyándose en algunos conceptos de la economía.

| Término | Significado | Similitud con la economía |
|----------------------------------|---|---|
| Movilidad | Intención de cambiar de lugar | Demanda nacional de bienes (deseos de compra) |
| Demanda de transporte | Alternativas posibles, dada la posición de la infraestructura | Demanda efectiva (posibilidades reales, dados los precios y los salarios) |
| Realización de los viajes | | Compras |
| Pasajeros transportados | Resultado, dadas las limitaciones en la oferta de transporte | Demanda realizada, dadas las cantidades disponibles de bienes y servicios |

Puede encontrarse una gran resistencia (por parte de diversas personas que están dentro del ámbito de los sistemas de transporte) a diferenciar los anteriores conceptos, por lo que debemos estar preparados para entender a qué se están refiriendo en realidad cuando hablan de movilidad. Por ejemplo, en la Gaceta Oficial del DDF se publicó en noviembre de 1972, lo siguiente (se han subrayado los conceptos que no corresponden con la diferenciación terminológica propuesta):

"En el Distrito Federal se generan diariamente alrededor de 12 millones de viajes-persona. Los distintos medios de transporte son utilizados en la forma que sigue:

| | | | | |
|--------------------------------------|-----------|--------------------|---|---|
| Ferrocarril metropolitano | 1.146,062 | viajes-persona/día | | |
| Autobuses urbanos | 5.576,006 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Autobuses suburbanos | 306,542 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Autobuses foráneos | 156,467 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Trolebuses y tranvías | 610,000 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Autobuses escolares y particulares | 232,960 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Taxis convencionales y de sitio | 1.195,158 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Taxis peseros | 370,832 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Automóviles particulares y oficiales | 1.185,830 | ∃ | ∃ | ∃ |
| Otros | 305,418 | ∃ | ∃ | ∃ |

Comparativamente con otras metrópolis, el transporte colectivo superficial tiene gran importancia."

Evidentemente, la idea debió ser que "se generan alrededor de 12 millones de tramos de viaje", o también "son transportados alrededor de 12 millones de pasajeros". Además se emplea, incorrectamente, el término "medio" y no el de "modo" o "subsistema". Lo que es innegable es que los tres conceptos anteriores (movilidad, demanda de transporte y pasajeros transportados) están muy relacionados, y son finalmente, una expresión de la magnitud y complejidad del problema de transporte urbano de pasajeros. Esa es precisamente la razón por la cual se le confunde en muchas ocasiones, dada la intención primordial de describir el problema. Así, nunca se pone énfasis en la naturaleza de los indicadores o características más usadas para ilustrar, o evidenciar los problemas de transporte.

A continuación se muestra una lista de indicadores (en algunos casos, se ha encerrado entre paréntesis el medio de presentación más común):

- a) Distribución modal de pasajeros transportados.
- b) Viajes generados por las diferentes zonas de la ciudad.
- c) Viajes según el propósito del viaje.
- d) Vehículos registrados en cada modo, en cada zona (plano).
- e) Viajes por modo y propósito.
- f) Tiempo del viaje.
- g) Distribución horaria de los viajes por modo, propósito, etcétera (gráfica).
- h) Longitud de los recorridos.
- i) Polos generadores o "atractores" de viajes (planos con barras).
- j) Líneas de deseo (planos).
- k) Volumen de tránsito o de pasajeros en interestación (polígono de carga).
- l) Longitud de recorrido según el modo de transporte.
- m) Cantidad de accidentes por modo (distribución porcentual, e índice por pasajeros), o por zona (planos).
- n) Cantidad de rutas o líneas de transporte (cuadros con longitudes, pasajeros, estaciones, etcétera o planos).
- o) Terminales a base de rutas o servicios (planos).
- p) Población residente (planos).
- q) Tendencias de crecimiento (series de tiempo graficadas).
- r) Vehículos estacionados (planos).
- s) Localización y volumen potencial de usuarios en las terminales foráneas.
- t) Etcétera.

4.5 El "problema" del transporte

Probablemente no hay aspecto de la vida diaria o profesional en la que exista mayor consenso que en lo relativo a la existencia de un problema de transporte en las ciudades. Sin embargo, cuando se trata de aportar una definición más precisa del problema se enfrenta un reto. El transporte es uno de los conocidos como "messy large problems" (problemas endemoniadamente complejos, según el Dr. Juan Prawda). Por tal motivo, se ha optado por presentar primero una lista de elementos que pueden servir para entender la intrincada interrelación que existe entre el transporte y sus manifestaciones en las ciudades; después se describen los elementos que consideramos son centrales para tratar de solucionar el problema de transporte: la falta de coordinación y la falta de integración del transporte.

En verdad, se espera que el lector desarrolle, probablemente a partir del siguiente material, algunas ideas más concretas acerca de cómo el transporte se relaciona directamente con el desarrollo urbano. A continuación se enlistan primero los síntomas más evidentes del problema, después se señalan sus causas aparentes, para terminar con una serie de situaciones que también afectan el problema en cuestión pero sólo de manera indirecta.

4.5.1 Síntomas del problema

Hemos considerado que algunas aspectos cotidianos del transporte son realmente manifestaciones del problema o sus consecuencias más evidentes. Por supuesto, para algunas personas, alguna de estas manifestaciones o síntomas son el verdadero problema de transporte, mientras que para otros el que suceda alguno de los eventos de la lista siguiente no tiene relevancia. En nuestra opinión, lo importante es el efecto final que tiene la aparición de estos problemas en el desarrollo de las actividades de quienes reciben dicho efecto y ello es lo que ameritaría ir al estudio de las verdaderas causas del problema para resolverlo y no quedarse en la eliminación de sus manifestaciones superficiales.

- a) Paradoja de Owen: "El transporte ha hecho posible la formación de las grandes concentraciones urbanas y ahora las ciudades están estrangulando la causa misma de su nacimiento".
- b) El traslado entre ciudades (a grandes distancias) puede ser más rápido que dentro de la ciudad (microdistancias).
- c) Se dedica cada vez más tiempo al transporte, como proporción del tiempo fuera del trabajo, restándolo al descanso o educación.
- d) Hay grandes diferencias entre los volúmenes de demanda de transporte fuera y dentro de las horas-pico, especialmente en el transporte suburbano.
- e) Complejidad del sistema de transporte: desorientación del usuario, recorridos "irracionales", caos en las emergencias o paros del sistema (falta de un plan logístico), ineficacia de las autoridades.
- f) Gran cantidad de accidentes.
- g) Opinión adversa y generalizada entre los usuarios de los sistemas de transporte a causa de su ineficiencia. Esta creencia se va profundizando por tres principales ideas (que pueden tener cierta base):
 - el transporte es algo sin valor; es un medio no un fin;
 - los costos y beneficios están mal repartidos;
 - se promete lo que no se puede resolver;
- h) Pérdida de horas-mujer, horas-hombre y horas-máquina por demoras. .
- i) Alto consumo de energéticos.
- j) Altos niveles de contaminación por fuentes móviles.
- k) Etcétera.

4.5.2 Causas

Por supuesto que se requiere un análisis especial para conocer las causas específicas que explican la existencia de muchos de los síntomas como los que recién se han descrito y que se pueden presentar en un contexto y circunstancia muy específicos. Sin embargo, sirva la siguiente lista para dar una primer idea de los fenómenos que, muy probablemente, están detrás de los problemas de transporte y que, por tanto, debieran ser resueltos o entendidos como primer paso para la solución de lo que conocemos como problema de transporte.

- a) Alta tasa de crecimiento natural (nacimientos-muertes) en la ciudad.
- b) Migración del campo a las ciudades.
- c) Mayores radios de acción de los vehículos y una mayor dispersión y ensanchamiento de las ciudades lo que ocasiona una mayor longitud de los viajes y una mayor demanda de transporte.
- d) Mayores ingresos o nivel de vida; por tanto, se genera mayor "necesidad" de realizar viajes (más viajes/persona al día).
- e) La diversificación de actividades en la ciudad implica una diversificación de los atributos de calidad exigidos por los usuarios.
- f) Concentración de actividades que provocan la formación de horas-pico.
- g) Crecimiento del parque vehicular y preferencia por el automóvil particular, lo cual implica más congestionamiento.
- h) Profundización y aceleración del cambio tecnológico en muchas actividades que deja obsoletos a los elementos del transporte (infraestructura, equipo, reglamentos, etcétera) antes de su vida útil, ya sea técnica, óptima o económicamente hablando. Con vida útil "técnica" se refiere a que el objeto en cuestión todavía puede funcionar bastante bien. La vida útil "óptima" es la calculada en el punto de compromiso entre costos marginales de mantenimiento y beneficios marginales por el uso). La vida útil que considere (además de la operatividad y los costos de mantenimiento) la congruencia, la funcionalidad y el impacto económico (directo e indirecto) de los elementos del transporte sobre la vida diaria de los usuarios se denominara vida útil "económica".
- i) Dilema en la competencia vs. regulación: si no hay competencia, se profundiza el rezago en el servicio. Cuando las empresas de transporte compiten sin control puede haber actitud desleal, abusos, accidentes, etc.
- j) Se va perdiendo la costumbre de caminar.

- k) Carencia de planes integrales. Los técnicos dan soluciones óptimas a "su" problema, que ha sido reducido y aislado, y que puede resultar sub-óptimo dentro del conjunto.
- l) No hay participación de la comunidad en la solución de sus problemas.
- m) Si existe un caótico desarrollo urbano, o si es excesiva la separación de funciones en el uso del suelo de cada región (aplicando algún plan de desarrollo, por ejemplo), se provoca una alta interdependencia de las zonas, y una mayor demanda de transporte.
- n) Mala organización global de los transportes para recolectar, distribuir o canalizar a los diversos tipos de usuarios en las diferentes horas del día, a lo largo de toda la ciudad.
- o) Más libertad, independencia y rebeldía de los usuarios del transporte en la ciudad, conforme ella crece.
- p) Las soluciones crean su propia demanda; por tanto, no siempre sirven para resolver los problemas.
- q) Los planes, programas, estudios y hasta la información misma se vuelve obsoleta con gran rapidez.
- r) Falta de tecnologías nacionales para la fabricación de vehículos y sus partes.
- s) Falta de legislación y reglamentación para la operación, o carencia de aplicación.
- t) Vialidad incompleta o sin mantenimiento.

4.5.3 Otros problemas

Si a los anteriores acontecimientos agregamos otros problemas que están muy relacionados con los anteriores, tendremos una verdadera situación compleja. Resulta importante que el tomador de decisiones en el transporte empiece por reconocer cuáles son sus verdaderas posibilidades y cuáles le corresponden a otros decisores: Esto, obviamente, sin dejar de considerar el efecto mutuo que tienen todos estos problemas que, por supuesto, muchas veces se presentan al mismo tiempo. La coordinación de planes y programas para atender estos problemas es indispensable.

- a) Problemas de estacionamiento.
- b) Estructuración y aplicación de tarifas.
- c) Problemas sindicales.
- d) Problemas sociales y políticos que toman como blanco el transporte, en particular al de superficie.
- e) Problemas financiero-administrativos de las empresas.
- f) Adaptación de la estructura jurídico-administrativa de los organismos públicos responsables del transporte, a las necesidades del mismo.
- g) Localización y déficit de la vivienda.
- h) Problemas jurídicos, en especial de competencia de autoridades en problemas comunes, por ejemplo, entre el Estado de México y el Distrito Federal.
- i) Regulación y control de vehículos.
- j) Financiamiento de las obras.
- k) Consumo de área urbana de alto costo.
- l) Selección, compra y mantenimiento de vehículos y sus partes, por ejemplo, en empresas de transporte de pasajeros.
- m) Transporte de carga: circulación, penetración y salida de la ciudad, estacionamiento, el reparto dentro de la ciudad, los servicios menores de consolidación.
- n) Problemas educativos afectados y que afectan al transporte.
- o) Falta de refacciones por carencia de divisas lo que motiva el mercado negro y las refacciones "hechizas" que no siempre son de calidad.
- p) Falta de integración con políticas de otros sectores: energético, de desarrollo urbano, vigilancia, de programación y presupuesto, etcétera.
- q) Etcétera.

4.6 Problemas típicos del transporte urbano y suburbano de pasajeros

Uno de las principales limitantes para resolver los problemas de transporte público de pasajeros, radica en que aún existen ciertas deficiencias en el instrumental técnico de que se dispone para diagnosticar y definir los problemas, diseñar, y evaluar las soluciones y su desempeño.

La anterior deficiencia se explica en parte, porque los problemas que se enfrentan en el ámbito del transporte urbano son de muy diversa naturaleza y complejidad. Se les puede clasificar en diferentes niveles, según la amplitud de cobertura en tiempo y espacio de tales problemas. Cuando se trate de problemas de movilidad de las personas en toda el área urbana y con una visión a largo plazo, puede pensarse en problemas de planeación del transporte y, en consecuencia, en la aplicación del proceso integral de planeación.

Por el contrario, hay situaciones en las que no hay tiempo para realizar estudios completos, dada la urgencia de resolver ciertas necesidades de transporte, o como resultado de la planeación, tales necesidades se circunscriben a un área muy bien localizada y de pequeñas dimensiones (por ejemplo, reubicar un cierre de circuito, rediseñar parte de una ruta, etcétera). Entonces, puede cambiar el instrumental técnico a ser usado en el diseño de las soluciones a tales problemas. Este último caso se puede identificar como problemas de diseño.

La anterior clasificación es especialmente valiosa, porque permite comparar los diferentes estados de desarrollo de las técnicas disponibles para atacar los problemas.

En el proceso de planeación se han logrado avances considerables, sobre todo en la generación de algoritmos y metodologías. Destacan por su difusión y aparente simplicidad, los modelos conocidos como de las cuatro fases: generación-atracción de viajes, distribución de viajes, selección modal, y asignación de ruta. Para los dos primeros se usan técnicas de calibración de modelos econométricos, y se parte de esquemas de ecuaciones lineales o no-lineales de diversas variables. Para la selección modal se tienen opciones que van desde simples gráficas de tendencias históricas en el uso de los modos, hasta complejos modelos econométricos, señalándose el uso de la multinomial logit. Por último, para la asignación de viajes, es común el empleo de algoritmos basados en las técnicas de optimización de la teoría de redes.

En cambio, en las actividades de diseño y atención de problemas específicos se encuentra un atraso evidente. Esto resulta paradójico, pues es a este nivel donde se presenta la mayor cantidad de problemas, llegando a conformar el cuadro cotidiano de los organismos encargados de la regulación y control de los servicios de transporte. Una de las causas de tal atraso consiste en que no se han

materializado y acumulado las experiencias obtenidas en el estudio y tratamiento de los problemas de diseño. En ese sentido, a continuación se presenta un esquema metodológico que intenta aportar bases para un tratamiento más sistemático de tales problemas.

Entre los problemas más evidentes, destacan:

- a) Cambio de ubicación de cierre de circuito.
- b) Cambio de ubicación de terminales.
- c) Cambio de ubicación de recorridos.
- d) Asignación de alargamiento, acortamiento o extensión de ruta.
- e) Proyecto de nuevas rutas.
- f) Proyecto de nuevas empresas.
- g) Asignación de vehículos a las rutas.
- h) Asignación de espacios en terminal de transbordo (paradero).
- i) Asignación de estaciones o paradas a lo largo de una ruta.
- j) Revisión del nivel de servicio en una ruta.

Cada uno de los problemas anteriores puede ser atendido por medio de diferentes estudios, según sus características y en la medida de la disponibilidad de tiempo y recursos. La secuencia metodológica que se expone a continuación no pretende ser exhaustiva o única.

4.6.1 Cambio de ubicación de cierre de circuito

Consiste en encontrar un nuevo lugar para que los vehículos puedan estacionarse al término de un recorrido, y esperar su turno para volver a salir. Debe considerarse la posibilidad de darle ciertos servicios mínimos a los operadores y los vehículos.

Causas: Ampliación de la flota; protestas de los vecinos; cambios en la ruta; cambios en la vialidad, nuevas empresas

Estudios:

- Inventario de equipo
- Investigación de la vialidad
- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Estudios de la demanda en cierres de circuito
- Estudio de demoras por cierre de circuito
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.2 Cambio de ubicación de terminales

Consiste en encontrar un espacio físico, pero de mayores dimensiones. Además de la función de cierre de circuito, la terminal puede incluir diversos servicios como son: encierro nocturno, reparaciones menores, mantenimiento preventivo, lavado y engrasado, etcétera. Puede incluir ciertas instalaciones como oficinas generales, refaccionarias, locales para operadores, etcétera.

Causas: Ampliación de la flota; protestas de los vecinos; cambios en la ruta; cambios en la vialidad, nuevas empresas

Estudios:

- Inventario de equipo
- Investigación de la vialidad
- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localización de polos de generación-atracción de viajes
- Estudios de la demanda en terminal
- Estudio de demoras en terminal
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.3 Cambio de ubicación de recorridos

Consiste en seleccionar las vías, arterias o calles por donde deben circular los vehículos de una ruta determinada, a la cual se desea modificar recorrido actual.

Causas: Reestructuración de rutas; cambios en la vialidad, nuevas empresas, presunción de baja captación de usuarios, etcétera

Estudios:

- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localización de polos de generación-atracción de viajes
- Inventario de servicios de transporte en zona de influencia
- Investigación de la vialidad
- Trazo de la ruta existente (recorrido actual)
- Estudio de tiempos de recorrido
- Estudio de demoras por intersecciones
- Trazo de la ruta propuesta
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.4 Asignación de alargamiento, acortamiento o extensión de ruta

Consiste en seleccionar las vías, arterias o calles por donde deben circular los vehículos de una ruta que mantiene, en parte, su mismo recorrido pero con modificaciones en su longitud.

Causas: Reestructuración de las rutas; cambios en la vialidad, nuevas empresas, presunción de baja captación de usuarios, demanda del servicio en zonas aledañas, etcétera

Estudios:

- EOD a bordo de la unidad (o estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localizar polos de generación-atracción de viajes
- Inventario del equipo actual
- Inventario de servicios de transporte en la zona de influencia
- Investigación de la vialidad
- Trazo de la ruta existente (recorrido actual)
- Estudio de tiempos de recorrido
- Estudio de demoras por intersecciones
- Estudio de demoras por cierre de circuito
- Trazo de la ruta propuesta
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.5 Proyecto de nuevas rutas

Consiste en seleccionar las vías, arterias o calles por donde deben circular los vehículos de una ruta que se desea establecer.

Causas: Reestructuración del servicio; presunción de potencial de demanda no atendida por otros modos; nuevas colonias o asentamientos irregulares; excesiva saturación en otras rutas; demanda del servicio en zonas aledañas a una ruta ya establecida, etcétera.

Estudios:

- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localizar polos de generación-atracción de viajes
- Inventario de servicios de transporte en zona de influencia
- Investigación de la vialidad

- Trazo de la ruta propuesta, y previsión de lugares de ascenso-descenso, tiempos de recorrido, demoras por intersecciones y por cierre de circuito
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.6 Proyecto de nuevas empresas

Consiste en proponer la estructura física (instalaciones, rutas, etcétera), la estructura jurídico-administrativa y la estructura operativa (servicios, horarios, etcétera) de una empresa de transporte público de pasajeros.

Causas: Reestructuración del servicio; presunción de potencial de demanda no atendida por otros modos; nuevas colonias o asentamientos irregulares; excesiva saturación en otras empresas; demanda del servicio en zonas aledañas a una empresa ya establecida, etcétera.

Estudios:

- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localizar polos de generación-atracción de viajes
- Inventario de servicios de transporte en zona de influencia
- Investigación de la vialidad
- Trazo de las rutas propuestas, y previsión de lugares de ascenso-descenso, tiempos de recorrido, demoras por intersecciones, y por cierre de circuito
- Localización de cierres de circuito y terminales, y previsión de demanda y demoras en terminal, y cierres de circuito
- Estudio de demoras en terminal
- Estudios de factibilidad financiera
- Esquema de organización y estructura jurídico - administrativa
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.7 Asignación de vehículos a las rutas ("despacho")

Consiste en determinar la cantidad de vehículos que deben ser asignados a las rutas, con el fin de satisfacer la demanda. Se definen las frecuencias de despacho ("intervalos de salida") tanto para las horas de máxima demanda como para el resto del día.

Causas: Disponibilidad limitada de flota, búsqueda de costo mínimo, quejas de usuarios, etcétera.

Estudios:

- Localizar polos de generación-atracción de viajes
- EOD a bordo de la unidad (o estudio de ascenso-descenso)
- Inventario del equipo actual
- Estudio de frecuencias de paso
- Estudio de tiempos de recorrido
- Estudio de demoras por intersecciones
- Estudio de demoras, por cierre de circuito
- Diseño de horarios de salida en los cierres de circuito
- Evaluación y análisis de implantación.

4.6.8 Asignación de espacios en terminal de transbordo (paradero)

Se refiere a la necesidad de especificar los andenes que corresponden a cada ruta, la cantidad de espacios que puede ocupar simultáneamente como máximo, así como los accesos y recorridos a desarrollar los vehículos de cada ruta.

Causas: Disponibilidad limitada de espacio y andenes, reestructuración de rutas y empresas, construcción de terminales, etcétera.

Estudios:

- Inventario de rutas y recorridos
- Inventario de puntos de penetración
- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- Inventario del equipo actual
- Estudio de frecuencias de paso

4.6.9 Asignación de estaciones o paradas a lo largo de una ruta

Consiste en determinar los lugares específicos en que se deberán realizar las maniobras de ascenso y descenso de usuarios a lo largo de una ruta.

Causas: Nuevas rutas; reestructuración de las rutas; cambios en la vialidad, nuevas empresas, presunción de excesivas de pocas paradas o estaciones, quejas de los usuarios, etcétera.

Estudios:

- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- EOD domiciliaria
- Localización de polos de generación-atracción de viajes.
- Investigación de la vialidad
- Trazo de la ruta existente (recorrido actual)
- Estudio de tiempos de recorrido
- Estudio de demoras por intersecciones
- Ubicación de las estaciones propuestas
- Evaluación y análisis de implantación

4.6.10 Revisión del nivel de servicio en una ruta

Consiste en determinar si las características de la ruta (recorrido, frecuencia de paso, cantidad de estaciones, etcétera) están de acuerdo con las necesidades de los usuarios.

Causas: nuevas rutas; reestructuración de las rutas; presunción de excesivo tiempo, sobresaturación o recorridos a pie; quejas de los usuarios, etcétera.

Estudios:

- Encuesta Origen-Destino (EOD) a bordo de la unidad (o al menos un estudio de ascenso-descenso)
- Localización de polos de generación-atracción de viajes
- Inventario del equipo actual
- Estudio de frecuencias de paso
- Estudio de tiempos de recorrido y demoras por intersecciones
- Estudio de demoras por cierre de circuito
- Investigación de la vialidad
- Encuesta de opinión de los usuarios

4.7 Estudios para el análisis de la demanda de transporte. Los estudios de origen y destino.

En las anteriores secuencias metodológicas, se ha mencionado una diversidad de estudios. A continuación se describen las características básicas del más importante y complejo orientado a conocer el comportamiento de la demanda (la movilidad).

4.7.1 Objetivos

En términos generales, los estudios de origen y destino de los viajes se realizan con la intención de investigar las características de la movilidad dentro de determinada región en estudio (una ciudad, parte de ella o varias poblaciones). La parte central del estudio se basa en una encuesta a los residentes de las diversas zonas de la región; con ella se obtiene información sobre la zona de origen y destino de los viajes, modos, costos, tiempos y demás datos que describen la forma como se realiza tal viaje. El uso principal de la encuesta radica en que constituye el insumo básico para la planeación analítica del transporte. Otros usos se relacionan con la planificación de las ciudades y las regiones, la evaluación del posible impacto de diversas medidas de la administración urbana, la evaluación de la política de transporte, etcétera.

4.7.2 Clasificación

Los estudios de origen y destino (en adelante, EOD) se clasifican en:

- a) Los EOD en caminos o intersecciones (vehiculares). Estos pueden hacerse por varios métodos:
 - Entrevista al lado del camino
 - Tarjetas postales al conductor
 - Método de las placas
 - Etiqueta sobre el vehículo
 - Cuestionarios para los empleados
- b) Los EOD a bordo de los vehículos del transporte público.
- c) Los EOD en las estaciones de intercambio o transbordo (terminales, correspondencias, etcétera).
- d) Los EOD en polos especiales de generación o atracción de viajes.
- e) Los EOD en los domicilios ("encuesta domiciliaria").

4.7.3 Metodología

En términos generales, los anteriores tipos de EOD tienen la misma secuencia de actividades para su realización. Así, aunque hay algunas diferencias específicas, las fases que se desarrollan para la encuesta domiciliaria son ilustrativas de la metodología general.

La encuesta domiciliaria consta de las siguientes actividades:

- a) Definición de objetivos.
- b) Delimitación del área en estudio y zonificación.
- c) Obtención del marco mastral y diseño estadístico del estudio.
- d) Diseño de instrumentos de captación de información ("cédulas") y de control de la encuesta.
- e) Diseño de instrumentos de procesamiento de información (generalmente consiste en programas computacionales de validación, resumen y expansión).
- f) Selección y capacitación de personal.
- g) Aplicación de los instrumentos de captación ("encuesta").
- h) Aplicación de los instrumentos de procesamiento.
- i) Elaboración de memorias, cuadros y planos con resultados, y matrices de viajes en archivos magnéticos.

En una publicación que estamos preparando habrán de aportarse elementos metodológicos, formatos y ejercicios de aplicación tanto del estudio de origen y destino de viajes como de otros estudios apenas descritos en el presente trabajo.

5 Modelos de comportamiento de los viajes

Reciben este nombre los modelos de planeación del transporte, también denominados como modelos de las cuatro fases; esto es, los modelos de generación, distribución, asignación de ruta, y selección modal. Estos modelos tienen el siguiente orden de aplicación: primero se simula el proceso de generación de viajes (cuántos viajes salen o llegan a cada una de las zonas), después se modela la distribución de tales viajes (o sea, conocer los destinos probables de los viajes que salen de cada zona hacia el resto de la ciudad), y finalmente, conociendo los extremos del viaje se simula el recorrido que haría el usuario dentro de la red de transporte de tal manera que minimice sus costos totales.

Como es evidente, el supuesto que sustenta la división del viaje en esas cuatro etapas consiste en considerar que existen cuatro decisiones (correspondientes a cada uno de los modelos), que pueden ser simuladas independientemente mediante modelos secuenciales. Lo anterior es necesario para facilitar la construcción de modelos, y ha probado ser de gran utilidad, cuando se les usa adecuadamente, es decir, como una herramienta, y no como una ley en la toma de decisiones.

Otro de los supuestos importantes consiste en plantear cierta secuencia para las anteriores decisiones. Sin embargo, no siempre se sigue la secuencia que se mencionó. En particular, existen diferentes formas de ubicación del modelo de selección modal dentro de la anterior secuencia.

Cada uno de los anteriores modelos se describe en el presente capítulo. En un documento posterior haremos un análisis más detallado de estos modelos así como de sus ventajas, desventajas, métodos de calibración, limitantes reales, ejemplos de aplicación y ejercicios.

5.1 Generación de viajes

En esta función se desea modelar el comportamiento de los usuarios en relación a la decisión de realizar un viaje. En otras palabras, trata de identificar los factores que motivan a los usuarios del sistema de transporte a salir de una zona teniendo como destino cualquiera otra de las zonas (esto se conocería como la producción del viaje) o, a arribar a una zona en particular teniendo como origen cualquiera de las zonas (esto sería la atracción del viaje), dentro del área de estudio.

Lo anterior da lugar al uso de dos modelos de generación de viajes: de producción y de atracción. Además, hay dos enfoques en la construcción de modelos de generación de viajes: los agregados y los desagregados. Los primeros tienen como unidad de trabajo la zona; los segundos, el hogar. Los agregados tratan de relacionar el total de viajes generados en cada zona con las variables de la zona (población total en la zona, cantidad total de vehículos en la zona, etcétera). Los modelos desagregados tratan de encontrar la relación entre los viajes generados en los domicilios con características de los mismos (cantidad de personas en el domicilio, cantidad de vehículos en el domicilio, etcétera).

Según la experiencia del US - Department of Transportation, los modelos desagregados tienen ventajas como son: menos datos requeridos para su calibración, transferibilidad a situaciones diferentes tales como análisis regionales, otras ciudades, etcétera, asimismo, más posibilidad para formular modelos no-lineales, son más explícitos en el mecanismo que genera los viajes (poder explicativo), y más fáciles de actualizar. Sin embargo, tienen como deficiencias depender más de datos sólo asequibles por encuesta directa, más laboriosos, y pueden representar una contradicción en relación el supuesto de que dentro de la zona el uso del suelo es homogéneo. Además, el pronóstico de sus variables puede ser bastante más difícil que en el caso de variables agregadas.

Entre las variables más comúnmente empleadas en los modelos de generación de viajes, como variables explicativas (las variables explicadas siempre son los viajes-persona-día), son:

∉ Para modelos agregados, con origen en el hogar:

1. Ingreso promedio por hogar, de los hogares asentados en la zona.
2. Población o densidad de población de cada zona.
3. Cantidad promedio de vehículos por hogar.
4. Localización de cada zona; puede ser su distancia al centro, o la distancia ponderada a los centros.
5. Tipificación o categorías de individuos u hogares, según su estrato socioeconómico.

∉ Para modelos agregados, con origen distinto al hogar:

1. Cantidad de empleados por categoría de empleo, por tipo de uso del suelo y por la zona.
2. La matrícula escolar por zona.
3. La cantidad de servicios por zona.

∉ Para modelos agregados, también se tienen los generadores especiales, por ejemplo: aeropuertos, terminales camioneras, etcétera, que se tratan casuísticamente, esto es, especialmente en cada caso.

∉ Para modelos desagregados se usan las mismas clases de variables, únicamente adecuadas al hogar o a la fuente de empleo.

Por otra parte, hay diversas técnicas para calibración de los modelos. La más comúnmente empleada es la regresión múltiple. Un ejemplo de modelo agregado, factible de calibrar por regresión múltiple, sería:

$$V_i = \zeta (Pob_i) + \beta (Veh_i) + \tau (Acc_i) + N.$$

$i = 1, 2, 3, \dots, n.$

donde:

V_i = viajes producidos por la zona i

Pob_i = población de la zona i

Veh_i = vehículos en la zona i

Acc_i = accesibilidad de la zona i

n = cantidad de zonas

Para la obtención del modelo de generación de viajes se propone el siguiente proceso resumido, que puede ser iterativo. Cabe notar que los pasos de este proceso son similares a los aplicables en los modelos de distribución de viajes y selección modal.

1. Definir las variables que desde el punto de vista técnico, se piensa pueden explicar el fenómeno en cuestión. Además, debe procurarse que tales variables sean congruentes con los postulados teóricos de los restantes modelos y sus resultados. Especial atención deberá ponerse en que las variables seleccionadas se agreguen al modelo si cumplen tres condiciones como mínimo: a) que tal variable es la que más contribuye a la significancia global del modelo; b) es la que tiene el menor esfuerzo para su correcto pronóstico; c) es la variable con mayor grado de precisión en tales pronósticos.
2. Ensayar diferentes modelos, esto es, estructuras matemáticas o conjuntos de ellas. En particular, deberán intentarse relaciones lineales y no-lineales, y diferentes métodos de combinaciones de ellas. Además, es factible que sea necesario hacer agregar información o incluso usar otras fuentes de información. En el primer caso, se sumarían los datos de varias zonas y así crear datos para una sola zona, o se cambiaría la zonificación si lo permite la información disponible; por ejemplo, podría intentarse la adición de los datos de las zonas, y conocer los datos a nivel delegacional. Ello permitiría probar mayor cantidad de estructuras matemáticas, a un menor costo; una vez probada la estructura matemática más confiable, se podría regresar a probar a nivel de las zonas. En el segundo caso, de búsqueda de fuentes alternas de información, puede resultar conveniente cuando haya motivos para pensar que determinada estructura matemática respondería (calibraría) mejor la información más confiable.

3. Seleccionar aquel modelo que tenga las mejores características de confiabilidad estadística, en los términos señalados anteriormente.
4. Verificar la validez de los resultados del modelo, tanto en relación con los datos de partida, como en cuanto a otras fuentes. También es del todo conveniente aplicar el modelo construido a una muestra reducida de zonas de las que se tengan estimaciones actuales de los volúmenes de viajes generados.
5. El pronóstico de las variables exógenas consiste en que una vez calibrado, validado y aceptado un modelo, se procederá a "explotarlo", para lo cual es necesario un pronóstico de las variables involucradas en el modelo seleccionado. Además, en forma paralela al proceso de construcción del modelo, habrá que desarrollar un pronóstico de la estructura urbana, por preliminar que sea, de tal suerte que sirva de base para el pronóstico en el tiempo y el espacio de las variables exógenas mismas.
6. Aplicar el modelo calibrado y validado, o sea, suministrarle las variables exógenas para calcular viajes futuros. Esto puede hacerse considerando tendencias distintas en las variables exógenas, por ejemplo: calcular la generación de viajes que tendría lugar bajo tendencias pesimistas, p ej, máximas tasas de crecimiento de la población, desequilibrios en la economía regional o nacional, reflejados en el nivel de ingreso familiar y el empleo, etcétera. Entonces, la generación de viajes pronosticada respondería al "escenario" de planeación seleccionado. A priori, se aconseja tener sólo tres tipos de escenarios: tendencia baja, alta, e intermedia; o pesimista, optimista y normal.
7. Revisar los pronósticos realizados en la generación de viajes, con especial referencia a ciertos indicadores demográficos (como en el caso de la población), urbanísticos (como en el caso de la densidad de viajes, y la densidad vehicular asociada a ella), o económicos (como podría ser la cantidad de recursos necesarios para el transporte).

5.2 Distribución de viajes

En este caso, el objetivo central es determinar el patrón de interacción total, es decir, el patrón de movimientos interzonales. En otras palabras, lo que interesa es conocer el mecanismo que provoca, que parte de los viajes "producidos" en cierta zona de origen vaya a otra zona en particular. Así, trata de identificar los factores que motivan a los usuarios del sistema de transporte a ir de una zona (la zona de producción del viaje) a otra zona (de "atracción" del viaje), dentro del área de estudio. Entre tales factores se encuentran la distancia entre las zonas o alguna otra medida de la impedancia o esfuerzo para ir de una a otra, los volúmenes de viajes producidos y atraídos, la importancia económica de ellas, etcétera. La mayoría de los modelos desarrollados para los de distribución de viajes, se basan en la analogía con el principio gravitacional.

De lo anterior, se postula la siguiente relación:

$$M_{ij} \propto \frac{V_i \cdot A_j}{d_{ij}^\eta}$$

La interpretación del modelo puede ser la siguiente: la cantidad M_{ij} de viajes (análogamente, la fuerza de atracción) que se tendrá entre la zona de origen i -ésima y la zona de destino j -ésima, es directamente proporcional a la cantidad de viajes de tales zonas (las masas), pero inversamente a la distancia o factores que impiden el traslado entre las zonas. En realidad, aunque se mantiene la idea gravitacional, los modelos más comúnmente usados tienen una estructura matemática diferente.

La versión de modelo gravitacional más empleado es la siguiente:

$$T_{ij} = T_i \frac{A_j F_{ij}}{\sum_k A_k F_{ik}}$$

donde:

T_{ij} = cantidad de viajes futuros entre las zonas i y j , pronosticados por medio del modelo

T_i = cantidad de viajes futuros generados en la zona i , pronosticados por medio del modelo de generación

A_j = cantidad de destinos de viaje en la zona j o una medida de ella, por ejemplo, la cantidad de empleos en la zona j

F_{ij} = factor de fricción o impedancia entre las zonas i y j (aunque para ser congruente con la expresión matemática, debiera tomarse como recíproco de la dificultad para el traslado)

Antes de pasar al siguiente modelo, cabe señalar que el producto de la fase de distribución de viajes es la matriz de viajes; esto es, la tabla de los viajes que se observarán entre los diferentes orígenes y destinos.

5.3 La selección modal

Este modelo guarda un gran atractivo teórico, y es de gran aplicación aún fuera del grupo de modelos de las 4 fases. Sin embargo, es el que ha tenido menos uso en la planeación del transporte.

Existen varias formas de resolver el problema de la selección modal dentro del proceso. Las más simples consideran que las actuales participaciones de cada modo de transporte dentro del total de viajes, habrá de mantenerse inalterable. Entonces, el "modelo" de selección de modo consiste en aplicar el porcentaje de participación de cada modo a los viajes interzonales.

Lo anterior es una medida que está lejos de considerar los factores de calidad del servicio que ofrece cada modo de transporte, los cuales van cambiando a lo largo del tiempo, y con ello modifican la preferencia de los usuarios. Por tal razón, se han desarrollado modelos que tratan de representar el fenómeno mediante el cual los usuarios valoran los atributos de calidad o utilidad que les ofrece cada modo de transporte. De los modelos matemáticos que se han propuesto para la selección modal, el más importante es el conocido como "multinomial logit", que se basa en el ajuste de datos que se comportan de acuerdo con una curva logística.

La fundamentación lógica de tal modelo se puede comprender mediante el siguiente ejemplo (ver figura de la siguiente página). En el eje de las ordenadas se tiene la participación porcentual del ferrocarril, mientras que el eje de las abscisas presenta la diferencia de la utilidad que puede darle a los usuarios el ferrocarril y la utilidad de los camiones. Evidentemente, cuando esta diferencia en el servicio sea igual a cero, es de esperarse que la participación del ferrocarril sea del 50%, dejando el resto para los camiones. Sin embargo, si el ferrocarril mejorara su servicio (una diferencia positiva en su utilidad), podría incrementar su participación.

Tal incremento tiene dos características: es exponencial (responde más que proporcionalmente a los incrementos en la utilidad), pero se va acotando, conformando el comportamiento de una curva logística. Un fenómeno similar pero inverso ocurriría, de disminuir la calidad del servicio del ferrocarril.

Aunque este ejemplo se basa en sólo dos modos de transporte, puede ser extensivo para varios modos. Así, la expresión matemática que formaliza la selección modal explicada en los anteriores términos, es la siguiente.

La probabilidad de seleccionar el modo en análisis (denotado MODO), de entre M modos posibles, está dada por:

$$P \langle \text{MODO:M} \rangle = \frac{\exp \langle -D \langle \text{MODO} \rangle \rangle}{\text{SUM} (\exp \langle -D \langle \text{M} \rangle \rangle)}$$

donde:

$D \langle \text{MODO} \rangle$ = “desutilidad” compuesta del modo en análisis.

= $N(M,1) \text{ var}(M,1) + N(M,2) \text{ var}(M,2) + \dots$

$\dots + N(M,N) \text{ var}(M,N) + \text{SESGO}(M)$

$N(M,i)$ = parámetro de ponderación de cada atributo

$\text{var}(M,i)$ = atributos de comparación de los modos

$D(M)$ = “desutilidad” compuesta de cada modo

La interpretación del anterior modelo puede ser la siguiente: se calcula la desutilidad que representa cada modo de transporte según diversos atributos (costo, tiempo, inaccesibilidad, etcétera), y las correspondientes ponderaciones que de ellos se tienen. Se multiplican tales atributos de calidad por su peso o importancia, y se suman para obtener un indicador de la desutilidad. En realidad, se pueden incluir atributos de utilidad, pero con signo negativo, para guardar homogeneidad en el modelo.

Contando con las desutilidades de cada modo, se puede aplicar el modelo para calcular la participación de cada modo. La idea es que a cada modo de transporte le corresponderá un porcentaje de usuarios, en igual proporción en que contribuye la suma de las exponenciales del valor negativo de sus funciones de desutilidad, o en otras palabras, en función directa de su utilidad en relación con los demás modos.

La aplicación de este modelo implica varias acciones previas que, en forma resumida, son:

- a) Identificación, (esto es, postular, probar, validar) los atributos de calidad que integran la función de utilidad.
- b) Determinar los parámetros de ponderación (importancia) de cada atributo de la función de utilidad o desutilidad.
- c) Calcular las probabilidades de selección de cada modo de transporte..

Cabe señalar algunas limitantes en el uso de este tipo de modelos. Primeramente, su aplicación esta especialmente recomendada cuando se comparan las opciones para viajes en un sólo modo de transporte, y no a viajes con más de un modo de transporte. La razón estriba en que no resulta fácil calcular atributos y sus respectivas ponderaciones para viajes multimodales. Además, las funciones de desutilidad deben contener atributos totalmente independientes entre si, es decir, no tener un coeficiente de correlación mayor de 0.70. No obstante lo anterior, el modelo de selección modal puede ser de gran provecho, sobre todo si se intenta conocer el efecto de selección, ya no de modos de transporte cuanto de modalidades: público versus privado. Esto es totalmente compatible con el proceso de aplicación de los modelos de las cuatro fases.

El proceso seria como sigue. Se simularía la cantidad de viajes que salen o llegan a cada zona (generación de viajes); se simularía la distribución de viajes, con lo que se obtendría una matriz de viajes que no distingue aún el modo de transporte. Acto seguido, se simularía la selección de modalidad teniendo dos matrices de viajes: una de usuarios del transporte privado, y otra de los usuarios del transporte público. Finalmente, se simularían los recorridos de los viajes dentro de las redes vial y de transporte, y ello daría la cantidad de usuarios en cada modo de transporte o en cada arteria.

5.4 La asignación de viajes

Esta función es también conocida como selección de rutas, asignación de ruta, etcétera. Es, de todas las funciones de planeación del transporte, la más compleja y laboriosa. En términos generales consiste en identificar las rutas óptimas de los viajes, esto es, la mejor forma en que las personas recorrerán las redes viales o de transporte para ir de sus orígenes a sus destinos.

Entre cualquier pareja de zonas, existe normalmente cierta cantidad de rutas diferentes factibles de ser usadas. Cada una involucra cierta cantidad de tiempo, costo, comodidad, etcétera, que los usuarios de las redes de transporte consideran para hacer su elección. Este fenómeno es el que se trata de reproducir o simular mediante el algoritmo de asignación de viajes.

La secuencia de pasos para el uso de un modelo de asignación de viajes es el siguiente:

1. Obtener una matriz de origen y destino de los viajes; puede ser producto de una encuesta o de la aplicación de modelos de distribución de viajes. Si ya se tiene una encuesta, implica que ya se hizo una zonificación; cada zona (ver figura de la página siguiente) se considera homogénea. Otro supuesto importante es que cada zona se asociará un centroide determinado (y sólo uno); ello es correcto en virtud de que lo que se hará es tratar de simular que los viajes que salen (o llegan) a dicha zona tienen como punto de partida el centroide.

Para ubicar los centroides, esto es, darle las coordenadas que le corresponden en el sistema de coordenadas de la ciudad, se puede recurrir a procedimientos similares a los empleados para calcular los centros de masa: por geometría de la zona, o mediante el conocimiento de los lugares donde se concentran los viajes de la zona, puesto que la intención del centroide es la de fijar el punto por donde se puede suponer que parten o llegan los viajes.

2. Se "construyen" las redes de transporte y vialidad por las que se simulará el recorrido de los viajes. Esto implica dos actividades: la primera consiste en definir las arterias, intersecciones, etcétera, de la red vial, así como rutas, transbordos, etcétera, de la red de transporte que serán consideradas. Una vez definido lo anterior, se seleccionan los arcos y nodos ⁽⁸⁾ que deberán incluirse en las redes, con el fin de simplificar, pero tratando de no dejar "desconectadas" partes importantes de las zonas.

Esta selección es necesaria debido a las limitaciones de los algoritmos computacionales y al esfuerzo que implica la construcción de redes (p ej, para la Ciudad de México, una red simplificada realizada en 1978 implicó un total de 25,000 arcos). La segunda parte de la construcción de las redes consiste en un inventario de las características reales (reales o actualmente observables o medibles "in situ") de los arcos y nodos definidos en la fase previa. Tales características a inventariar son aquellas que tienen influencia en el algoritmo de asignación (en la selección de la ruta de menor esfuerzo), como pudieran ser: velocidades de recorrido en la hora de máxima demanda, distancia entre nodos, capacidad de los arcos y nodos, sentidos de circulación, prohibiciones de estacionamiento, restricciones para la circulación de peatones, etcétera.

3. Acopio de estadísticas respecto la operación actual de las redes vial y de transporte. Se refiere a los datos que revelan las condiciones actuales de las redes: volúmenes de usuarios en las intersecciones o arcos de la red (polígonos de carga), tiempos de recorrido, volúmenes de usuarios en transbordos de ruta, modo o dirección en los nodos, volúmenes de vehículos, niveles de saturación, etcétera. Esta información tendría dos usos no excluyentes: primero para permitir la calibración del modelo de asignación de viajes al comparar los volúmenes, tiempos, niveles de saturación, etcétera, que simula el modelo contra los mismos parámetros observados en los arcos, nodos, rutas o zonas respectivos. El segundo uso sería resultado de la posible detección de deficiencias o problemas actuales observados en la operación de las redes vial y de transporte. Con tal detección de problemas es factible alimentar la explotación del modelo de asignación de viajes para prever las consecuencias de ciertos cambios tendientes a resolver dichos problemas en las redes.

^{8*} Se entiende por arco de una red, la parte de la ruta de transporte o de la arteria vial que queda comprendida entre dos nodos. Se entiende por nodo de una red vial o de transporte, lugar de la ruta donde es potencialmente factible realizar un cambio de ruta o de arteria; esto es, donde se conectan dos rutas, dos arterias o donde se conectan los centroides de zona con las redes (ver la figura de la página siguiente).

4. Aplicación del modelo de asignación con fines de calibración. En esta fase se supone que el algoritmo computacional ya se elaboró o se adquirió, y sólo se está adaptando a la ciudad o zona en estudio. Así que lo que se procede a realizar son "corridos" (computacionales), probando el modelo de asignación después de haberlo alimentado de la matriz de viajes, y de los datos de las redes vial y de transporte. Después de cada corrida se comparan los datos de operación que reproduce el modelo respecto a los observados en las redes (fase 3a) para determinar si el modelo tiene o no divergencias notables. En caso de hallar tales divergencias, se procedería a buscar la fuente de discrepancia, que puede ser de dos tipos: en los datos de insumo (matriz de viajes, o redes vial y de transporte), o en el algoritmo de asignación (criterio para seleccionar la ruta óptima).

En el segundo tipo, algunos autores sugieren aplicar pruebas estadísticas, pero su complejidad es muy grande y la confiabilidad de tales pruebas no es alta. En consecuencia, parece más razonable considerar calibrado el modelo cuando reproduce los parámetros de interés, con un error promedio bajo (p ej, 5 o 10 %) fijado en función de la importancia de las decisiones que se tomen con los datos del modelo.

5. Explotación del modelo. Se refiere a la posibilidad de realizar corridas del modelo de asignación de viajes, pero con fines de explorar las posibilidades de resolución de problemas mediante ciertos cambios en las redes vial y de transporte; evidentemente, requiere haber calibrado satisfactoriamente el modelo. Entre los posibles cambios se encuentran: cambios de sentido en un arco, cambio de capacidad de un arco, nuevas vías o rutas (conjunto de arcos y nodos nuevos), cierre intempestivo de algunos arcos (lo que permitiría ayudar a elaborar un plan de contingencias para casos de accidentes o siniestros), etcétera.

Los modelos no son eternos. Una vez calibrado el modelo de asignación de viajes permiten simulaciones durante un tiempo dado. Sin embargo, requerirá actualizarse constantemente, pues los datos (las redes vial y de transporte, matrices de viajes, etcétera) con los cuales fue calibrado el modelo pasa a ser obsoleto con cierta rapidez. Inclusive, el propio algoritmo de asignación puede ser mejorado o sustituido por otro que reproduzca mejor el comportamiento de los usuarios, o que introduzca los adelantos de la investigación más reciente en materia de planeación de transporte.

En relación con los algoritmos de asignación cabe aclarar lo siguiente: Primeramente, el principio fundamental de la asignación de viajes o selección de ruta, consiste en calcular la impedancia (integrada por los tiempos de recorrido, costos, etcétera) de los diferentes arcos de las redes de transporte. Con tal información se calculan las impedancias totales implicadas en las posibles trayectorias que unen las zonas de origen y destino de los viajes. Para cada par de zonas se elige la trayectoria de mínima impedancia. Hasta aquí, todos los algoritmos de asignación de viajes más o menos coinciden. Sin embargo, al momento de "cargar" o "asignar" los viajes a los arcos, empiezan las diferencias. Los algoritmos más simples seleccionan la ruta de menor impedancia, y a ésta le asignan todos los viajes. En otras palabras, suponen que todos los viajes de la zona *i*-ésima seleccionan exactamente la misma ruta para ir al destino *j*-ésimo. Este procedimiento es conocido como el método de "todo o nada" (ver figura de la página siguiente).

Otros modelos tratan de introducir el efecto del congestionamiento en la atracción que representa una ruta para los usuarios. Ello se puede realizar mediante nomogramas o funciones matemáticas que van alterando la impedancia de los arcos conforme se van saturando; esto puede permitir asignaciones supuestamente más realistas. Sin embargo, aún persiste el problema de que se ha supuesto que los datos de los arcos (velocidad, volumen de usuarios, tiempo y costo de recorrido, etcétera), así como sus relaciones matemáticas, son determinísticas. Esto es, se parte de datos paramétricos y no de funciones o distribuciones de probabilidad. Por tal razón, los algoritmos de asignación de viajes más sofisticados tratan de introducir el efecto probabilístico que tiene la selección de ruta mediante la asignación probabilística.

Consiste en que para cada zona, se calculan las impedancias de las trayectorias que las unen, y con base en ellas calcular la probabilidad de ser escogidas, dada su impedancia. Así, aunque las trayectorias de mayor impedancia tienen menores probabilidades de ser seleccionadas, son cargadas con cierta cantidad de viajes (ver figura de la página siguiente). De todas maneras, aun los modelos más sofisticados mantienen una cantidad muy grande de supuestos; y deben ser tomados en su valor real (un instrumento auxiliar en la toma de decisiones), y ser mejorados constantemente.

Bibliografía

ADLER, HANS A. Economic Appraisal of Transport Projects. A Manual With Case Studies. The John Hopkins Univ. Press. USA, 1987.

ALTSHULER, ALAN. Current Issues in transportation Policy. Lexington Books. 1979.

ANDERSON, N., Sociología de la Comunidad Urbana F. C. E., México. 1976.

ARMSTRONG-W., ALAN & THIRIEZ, SEBASTIEN., Bus Services. Reducing Costs. Raising Standards. World Bank Technical Paper 68, Washington, 1987.

BANCO MUNDIAL. Transportes Urbanos. Documento de Política Sectorial, 1968.

BLAIR, R. N. Y WILSON, C. Elementos de Ingeniería de Sistemas Industriales. 1973. Ed. Prentice-Hall Int.

BOAGA, GIORGO. Diseño de Tráfico y Forma Urbana. Ed. Gustavo Gili. 1972.

BONAVIA, R. MICHAEL. Economía de los Transportes. Fondo de Cultura Económica. 1956.

BUCHANAN, COLIN D. El Tráfico en las Ciudades. Ed. Tecnos. 1963.

BUTTON, KENNETH. Transport Economics. Elgar Pub. Co., Vermont, USA, 1993.

BUTTON, K.J. & PEARMAN, A.D. The Economics of Urban Freight Transport. The MacMillan Press Ltd., London. 1981.

CARBAJO, JOSÉ. Regulatory Reform in Transport: Some Recent Experiences. The World Bank, Washington, 1993.

COLE, STUART. Applied Transport Economics. Policy, Management and Decision Making. Editorial Kogan Page Limited, 1998.

COMMITTEE FOR ECONOMIC DEVELOPMENT. Developing Metropolitan Transportation Policies: A Guide for Local Leadership. New York, USA. 1965.

DANIELS, P.W. and WARNE, A.M. Movimiento en Ciudades. Transporte y tráfico urbanos. Inst. de estudios de admón. local. Madrid, 1983.

DICKEY, JOHN W. Manual del Transporte Urbano Ed. Inst. de Estudios de Admón. Local. 1977.

DICKEY, JOHN and MILLER, LEON. Road Project Appraisal. Ed. John Wiley & Sons. 1984.

DODGSON, J.S. & TOPHAM, N., Bus Deregulation and Privatization. Avebury, London, 1988.

DOLCE, JOHN, Analytical Fleet Maintenance Management. SAE, Inc., USA, 1994.

DOLCE, JOHN, Fleet Management. McGraw-Hill Co., USA, 1984.

EDWARDS, W. Toma de Decisiones. 1967 Ed. Fondo de Cultura Econ.

ESTUDIOS E INFORMES DE LA CEPAL. La planificación del Transporte en Países de América Latina. Naciones Unidas. 1985.

EVANS, ALAN. Urban Economics. Blackwell, Ltd., Oxford, UK. 1985.

FABRICKY, W.J., y THUESEN, G.J. Decisiones Económicas. Análisis y Proyectos. Ed. Prentice/Hall International.

FAWCETT, P., The Road to Transport Management. Fleetboks, Manchester, UK. 1984.

FOOT, DAVID. Operational Urban Models. Methuen & Co., London 1981.

FOWKES, A., NASH, C., and WHITEING, A. (1985) Understanding trends in Inter-city rail traffic in Great Britain. Transportation Planning and Technology.

GAKENHEIMER, RALPH (OCDE). The Automobile and the Environment. MIT Press, 1978.

GIANNOPOULOS, G.A., Bus Planning and Operation in Urban Areas: A Practical Guide. Avebury, Gower Pub. Co. Ltd., UK, 1989.

GIANNOPOULOS, G. and GILLESPIE, A. Transport and Communications Innovation in Europe. Belhaven Press, London. 1993.

GLAISTER, S. (1983) Some Characteristics of Rail Commuter Demand. Journal of Transport Economics and Policy.

GOICOCHEA, A., HANSEN, D.R., and DUCKSTEIN, L. Multiobjective Decision Analysis with Engineering and Business Applications. Wiley and Sons. 1982.

GUJARATI, D. (1988) Basic Econometrics. McGraw-Hill International Editions.

GUTIÉRREZ SANTOS, LUIS. Relaciones entre los Criterios de Preparación, Evaluación y Selección de Proyectos y las Estrategias de Desarrollo. Artículo publicado en TRIMESTRE FISCAL, Año 3, No. 12, 1980. Guadalajara, Jal., México.

GWILLIAM, K. M., and MACKIE, P.J. Economics and Transport Policy. 1975. George Allen and Unwin LTD.

HARRIS, NIGEL G. and ERNEST GODWARD. The Privatisation of British Rail. Railway Consultancy Press, 1997.

HASS-KLAU, CARMEN. The Pedestrian and City Traffic. Belhaven Press, London, 1990.

HEGGIE, IAN. Transport Engineering Economics. 1972. McGraw Hill.

HILL, MORRIS. Planning for Multiple Objectives. 1973. Ed. RSR Institute, Pennsylvania.

HOROWITZ, J. Air Quality Analysis for Urban Transportation Planning MIT Press, 1982.

HUNTLEY, PETER G., Tendering and Local Bus Operation (The Practical Handbook). Croner Publications Ltd., London, 1989.

ISLAS RIVERA, VÍCTOR, Diseño de Rutas de Transporte. Tesis de Ingeniería en Transporte. Instituto Politécnico Nacional. México. 1983

ISLAS RIVERA, VÍCTOR, Introducción a la Ingeniería de Transporte. DGDA, SEP, 1989.

ISLAS RIVERA, VÍCTOR, Estructura y Desarrollo del Sector Transporte en México. El Colegio de México, México, 1990.

ISLAS RIVERA, VÍCTOR, Llegando Tarde al Compromiso. El Colegio de México, 2000.

JANE SOLÁ, JOSÉ. El Transporte Colectivo Urbano en España. Ed. Ariel, España.

JONES, I. and NICHOLS, A. (1983) The Demand for Inter-City Rail Travel in the United Kingdom. Journal of Transport Economics and Policy.

KLAASSEN, LEO; JAN BOURDREZ and JACQUES VOLMULLER. Transport and Reurbanization. Gower Pub. Co., England. 1981.

KRUECKEBERG & SILVERS. Análisis de Planificación Urbana. Ed. Limusa. 1978.

LANE, ROBERT; POWELL, T. & SMITH, P. Planificación Analítica del Transporte. Ed. Instituto de Estudios de Administración Local. 1975.

MANHEIM, MARVIN L. Fundamentals of Transportation System Analysis. Vol. 1: Basic concepts. The MIT Press, Mass., USA, 1979.

MEYER, MICHAEL D., and MILLER, ERIC J., Urban Transportation Planning. A Decision Oriented Approach. MacGraw-Hill Inc., USA, 1984.

MITCHELL, ROBERT B. and CHESTER RAPKIN. Urban Traffic. A function of Land Use. Columbia University Press, N.Y. 1954.

MOHRING, HEBERT.- Transportation Economics, Ed. Ballinger Publishing Company, Cambridge, Mass. USA.

NASH, C., and PEARCE, D.W. The Social Appraisal of Projects. Macmillan Ltd. UK, 1981.

NIJKAMP, PETER. Multiple Criteria Analysis. Gower Publishing, England.

PAPACOSTAS, C.S. (1987) Fundamentals of Transportation Engineering. Prentice Hall.

POOLE, A. Moving people. Transport Policy in the Cities of Brazil. IDRC, Ottawa, 1994.

OECD, Road Research Group. Urban Traffic Models: Possibilities for Simplification. Paris, France. 1974.

OLDFIELD, R. and TYLER, E. (1981) The Elasticity of Medium-Distance Rail Travel. Transport and Road Research Laboratory. TRRL Laboratory Report.

ORTUZAR, J., and WILLUMSEN, L. Modelling Transport. Wiley & Sons Ltd., UK. 1994.

OWEN, A., and PHILLIPS, G. (1987) The characteristics of Railway passenger demand: an econometric investigation. Journal of Transport Economics and Policy.

QUINET, EMILE.- Analyse Economique, Ed. Económica, Paris, Francia.

QUINET, EMILE.- Economie des Transports, Ed. Económica, Paris, Francia.

RAIFFA, HOWARD. Análisis de la Decisión Empresarial. 1978. Fondo Educativo Interamericano.

RATCLIFFE, BRIAN., Economy and Efficiency in Transport and Distribution. Kogan Page Ltd., London, UK. 1982.

REPLOGLE, MICHAEL. Bycycles & Public Transportation The Bicycle Fed., Wash., USA. 1983.

ROOS, DANIEL, and ALTSHULER, ALAN. The future of Automobile. MIT Press, 1984.

ROSCHLAU, MICHAEL W. Urban Transport in Developing Countries: The Peseros of México City. Centre for Transportation Studies. Vancouver, Canada. 1981.

ROYAL COMMISSION ON ENVIRONMENTAL POLLUTION. 18th. Report, Transport and the Environment. Oxford Univ. Press, 1995.

SHARP, C.H. Economía del Transporte. 1973. The Macmillan Press.

STUBBS, P.C. TYSON, W. J. and DALVI, M. Q. Transport Economics. Studies in Economics:15. Editado por Charles Carter. 1988.

SUTTON, JOHN. Transport Coordination and Social Policy. Avebury, London. 1988.

THE EUROPEAN CONFERENCE OF MINISTERS OF TRANSPORT. 11th. International Symposium on Theory and Practice in Transport Economics. ECMT, Brussels. 1989.

THOMPSON, J.M. Teoría Económica del Transporte. 1976. Madrid, España. Ed. Alianza Universidad.

THOMPSON, MICHAEL. Toward Better Urban Transport Planning In Developing Countries. World Bank Staff Working papers. 1983.

TOLLEY, RODNEY. The Greening of Urban Transport. Belhaven Press, London, UK. 1993.

TORRES V., GUILLERMO. Modernización de Caminos Rurales: la Evaluación Económica como Herramienta en la Toma de Decisiones. Publicación Técnica No. 216 Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Qro. 2002.

TRAIN, KENNETH. Qualitative Choice Analysis: Theory, Econometrics and an Application to Automobile Demand. 1986. The MIT Press.

TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY. The Demand for Public Transport. TRRL, UK. 1980.

VICKERMAN, R.W. Spatial Economic Behaviour. St. Martín Press. New York, 1980.

VALERO CALVETE, JAVIER. Transportes urbanos. Ed. Dossat. 1974.

VICKERS, JOHN, and YARROW, GEORGE. (1988) Privatization. An Economic Analysis. MIT Press.

VOIGT, FRITZ. Economía de los Sistemas de Transporte. 1954. F.C.E. México.

VUCHIC, VUKAN R.. Urban Transportation. MIT Press, 1982.

WEICHER, JOHN C. Private Innovations in Public Transit. AEIPPR, Washington, 1988.

WHITE, PETER R. Planning for Public Transport. Hutchinson & Co. Pub., London, 1976.

WHITELEGG, JOHN. Transport for a Sustainable Future. Belhaven Press, London, 1993.

WINGO, LOWDON. Transporte y Suelo Urbano. Ed. Oikos-Tau, 1972.

WOOD, DONALD F. and JOHNSON, JAMES C. Contemporary Transportation. Maxwell-Macmillan intl. ed., N.Y., USA, 1989.



CIUDAD DE MEXICO

Av. Patriotismo 683
Col. Mixcoac
03730, México, D. F.
Tel (55) 56 15 35 75
55 98 52 18
Fax (55) 55 98 64 57

SANFANDILA

Km. 12+000, Carretera
Querétaro-Galindo
76700, Sanfandila, Qro.
Tel (442) 2 16 97 77
2 16 96 46
Fax (442) 2 16 96 71

Internet: <http://www.imt.mx>
publicaciones@imt.mx