

Pablo Cortés Achedad – Luis Onieva Giménez
(Editores)

INGENIERÍA DE ORGANIZACIÓN

Modelos y Aplicaciones



© Pablo Cortés Achedad y Luis Onieva Giménez (eds.), 2008

Reservados todos los derechos.

«No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, ni su tratamiento informático, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright.»

Ediciones Díaz de Santos.

E-mail: ediciones@diazdesantos.es

Internet: <http://www.diazdesantos.es/ediciones>

ISBN: 978-84-7978-847-6

Depósito legal: M. 5981-2008

Diseño de cubierta: Ángel Calvete

Fotocomposición: Fer.

Impresión: Edigrafos.

Encuadernación: Rústica-Hilo.

Impreso en España

Autores

Pablo Cortés Achedad. Obtuvo la titulación de Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla en el año 1996. El profesor Cortés ha disfrutado de estancias de investigación en el Philips Centre for Manufacturing Technology en Eindhoven (Holanda), así como en el Departamento de Computer Science del King's College of London donde trabajó en la aplicación de métodos de Inteligencia Artificial. Obtuvo su tesis doctoral por la Universidad de Sevilla en el año 2000.

Pablo Cortés trabaja en el grupo de Ingeniería de Organización de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, donde es Profesor Titular de Universidad e investiga aspectos relacionados con la optimización en redes de comunicación, transporte y aplicación de métodos de Inteligencia Artificial, siendo autor de numerosas publicaciones en revistas científicas en estos campos. Es investigador responsable de distintos proyectos de I+D+i financiados tanto por administraciones públicas como por empresas privadas.

José Manuel García Sánchez. Obtuvo la titulación de Ingeniero en Informática por la Universidad de Sevilla en 1998 y se doctoró por la misma Universidad en 2003 en el área de Ingeniería de Organización. Su investigación se centra en el campo de la investigación operativa aplicada al diseño de redes, la programación de operaciones y la logística de procesos con restricciones de tiempo, donde ha publicado diversos artículos en revistas científicas de ámbito internacional. Actualmente es profesor contratado doctor en el Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Universidad de Sevilla.

José Guadix Martín. Es doctor Ingeniero Industrial por la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, donde es profesor de Ingeniería de Organización, autor de varios libros y numerosas publicaciones de carácter nacional e internacional, destacando en ellas la necesidad del Ingeniero en las decisiones empresariales.

Ester Gutiérrez Moya. Es profesora del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Universidad de Sevilla. Licenciada en Administración y Dirección de Empresas, Licenciada en Ciencias y Técnicas Estadísticas y Doctorada por la Universidad de Sevilla, entre sus áreas de especialización destacan las series cronológicas, el análisis multicriterio y el control estadístico de procesos. Ha participado como investigadora en diferentes proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, la Junta de Andalucía y la Universidad de Sevilla.

Jesús Muñozuri Sanz. Es profesor contratado doctor de la Universidad de Sevilla. Su formación incluye los títulos de Ingeniero Industrial por la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, Master en Diseño y Producción Industrial por la Universidad de Gales Swansea y Doctor en Ingeniería de Organización por la Universidad de Sevilla. Sus áreas fundamentales de trabajo, en las que ha publicado diversos artículos de investigación en revistas internacionales, y que han dado lugar a un amplio número de proyectos de investigación y desarrollo, comprenden la logística y el transporte, la gestión de la producción y la aplicación de métodos cuantitativos a problemas de ingeniería de organización.

Luis Onieva Giménez. Doctor Ingeniero Industrial por la Escuela Superior de Ingenieros de Universidad de Sevilla, es catedrático de universidad y responsable del grupo de investigación

Ingeniería de Organización, ha participado como investigador principal en numerosos proyectos de Transferencia de Tecnología entre la Universidad y la Empresa, así como coordinador y ponente en numerosos seminarios, cursos y programas master.

Juan Nicolás Ibañez Rivas. Es Institute Research Fellow en el Institute for Transport Studies de la University of Leeds en Reino Unido. Es Doctor Ingeniero Industrial por la Universidad de Sevilla por su estudio del comportamiento de los agentes involucrados en el transporte mediante el empleo de modelos de elección discreta y diseño de experimentos de elección. Desde 2002 ha participado en diferentes proyectos de investigación financiados a través de la Unión Europea y organismos públicos españoles y británicos. Le han sido concedidas cuatro becas de investigación en concurrencia competitiva, incluyendo una EU Marie Curie Visiting Scholarship, y ha disfrutado de estancias de investigación en la University of Shffield y en la University of Newcastle-upon-Tyne, ambas en Reino Unido. Parte de los resultados derivados de su trabajo se han presentado en congresos nacionales e internacionales y publicados en revistas y libros internacionales. Ha impartido clases en la titulación de Ingeniería Industrial en la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla en asignaturas adscritas a la Ingeniería de Organización.

Índice

Autores	VII
Presentación	IX
1. La Ingeniería de Organización en la historia y sus campos de aplicación (<i>Luis Onieva Giménez, Pablo Cortés Achedad</i>)	1
1.1. Introducción	1
1.2. La configuración de la Ingeniería de Organización en la historia y en el contexto académico español	2
1.3. El enfoque de los Métodos Cuantitativos sobre la Ingeniería de Organización.....	13
1.4. Bibliografía.....	25
2. Programación de operaciones en sistemas productivos y logísticos (<i>José Manuel García Sánchez</i>)	29
2.1. Introducción	29
2.2. Programación de operaciones en sistemas productivos	30
2.3. Programación de operaciones en sistemas logísticos con restricciones de tiempo	39
2.4. Conclusiones	73
2.5. Bibliografía.....	74
3. Optimización del reparto urbano de mercancías (<i>Jesús Muñuzuri Sanz</i>)	77
3.1. Introducción	77
3.2. Modelos de planificación de infraestructura	80
3.3. Modelos macroscópicos de flujo.....	92
3.4. Cálculo de rutas de vehículos en ámbitos urbanos.....	100
3.5. Evaluación de políticas de transporte en el ámbito urbano	123
3.6. Bibliografía.....	128
4. Gestión de empresa de servicios (<i>José Guadix Martín</i>).....	133
4.1. Introducción	133
4.2. Requisitos y sectores de aplicación.....	135
4.3. Modelos de resolución	140
4.4. Componentes del problema.....	149
4.5. Métodos de previsión	152

4.6. <i>Yield Management</i> bajo demanda determinada	156
4.7. <i>Yield Management</i> bajo demanda estocástica	172
4.8. Conclusiones	177
4.9. Bibliografía.....	178
5. Diseño y planificación de redes de telecomunicación (Pablo Cortés Achedad).....	183
5.1. Introducción	183
5.2. Modelos para la planificación de la infraestructura básica de red	188
5.3. Modelos para la planificación global de red	211
5.4. Modelos para la construcción de redes con redundancia	227
5.5. Conclusiones	234
5.6. Bibliografía.....	235
6. Análisis de decisiones de transporte mediante modelos de preferencias y diseño de experimentos (Juan Nicolás Ibáñez Rivas)	239
6.1. Introducción	239
6.2. Ejemplo de estudio de preferencias. Selección de proveedor de servicios en una cadena logística	245
6.3. Datos de preferencias	247
6.4. Modelos lineales de preferencias	252
6.5. Modelos no lineales de preferencias	253
6.6. Función de valor extremo generalizado (GEV)	272
6.7. Combinación de datos de preferencias reveladas y declaradas	283
6.8. Diseños de experimentos para análisis de preferencias	285
6.9. Conclusiones	295
6.10. Bibliografía.....	297
7. La predicción de la demanda de energía eléctrica (Ester Gutiérrez Moya).....	305
7.1. Introducción	305
7.2. Importancia de la previsión de la demanda de energía eléctrica	308
7.3. Factores que influyen en la previsión de la demanda de energía eléctrica.....	310
7.4. Modelización de la predicción de energía eléctrica	317
7.5. Conclusiones	354
7.6. Bibliografía.....	356
Índice analítico	361

Presentación

Esta obra pretende ser un acercamiento a diversas aplicaciones avanzadas de la Ingeniería de Organización en su aplicación a la resolución de problemas asociados a la planificación, gestión y control de sistemas productivos y de servicios. Entre ellos hemos considerado, sin ánimo de pretender ser exhaustivos por imposible, los problemas de programación de operaciones como asignación temporal de recursos para realizar un conjunto de actividades, el reparto de mercancías en entornos urbanos, la aplicación de las técnicas *yield management* a la gestión de empresas de servicios, el diseño y planificación de redes de telecomunicación, el modelado de preferencias y diseño de experimentos para la ayuda a la toma de decisiones en el análisis de sistemas de transporte y, por último, la previsión de demanda de energía eléctrica. En todos los casos se realiza una extensiva revisión de los problemas asociados, haciendo especial hincapié en sus aspectos metodológicos y su tratamiento en la literatura científica más relevante.

Cabe señalar cómo la Ingeniería de Organización es una materia que se viene destacando en las escuelas de Ingeniería españolas como clave, tanto por las salidas profesionales que habilita como por el alto grado de demanda que tiene por parte de los estudiantes. En este sentido destaca el papel predominante que tiene en las Escuelas de Ingenieros con mayor tradición, como son las de Madrid, Barcelona, Valencia, Bilbao y Sevilla, si bien también destaca como una disciplina que ha venido creciendo significativamente en otras escuelas con un gran desarrollo en los últimos años, por ejemplo, y entre otras, las de Valladolid, Gijón, Carlos III, Vigo, Zaragoza, Jaén, Málaga o Burgos entre otras.

También creemos importante hacer constar el notable interés por la Ingeniería de Organización existente en países de Iberoamérica, donde ésta se impone como un campo en auge y de prometedor futuro. La oportunidad de disponer de un texto como éste en español, del cual no existen precedentes, se presenta como una ventaja de oportunidad destacable.

Esta obra nace de la experiencia académica, profesional e investigadora de sus autores, los cuales son, en su totalidad, especialistas de la materia sobre la que desarrollan el correspondiente capítulo, en cuyo ámbito disponen de numerosas publicaciones científicas en revistas de impacto internacional. Todos son doctores en Ingeniería Industrial, junto con una

doctora en Ciencias Económicas y Empresariales, así como miembros del Departamento de Organización Industrial y Gestión de Empresas de la Universidad de Sevilla. Ejercen su labor en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, de entre las de mayor prestigio en España, y en la que se imparten actualmente siete titulaciones superiores de Ingeniería a cinco mil alumnos, siendo dicha experiencia la base principal para la elaboración del material que aquí se presenta.

Se destaca, asimismo, que los autores son profesores del máster en Organización Industrial y Gestión de Empresas, uno de los títulos de máster oficial que oferta la Universidad de Sevilla dentro del programa oficial de postgrado en Ingenierías. Dicho máster es el heredero del programa de doctorado Ingeniería de Organización de la Universidad de Sevilla, reconocido en 2003 con la primera Mención de Calidad otorgada por el Ministerio de Educación y Ciencia en el ámbito de la Ingeniería de Organización en la universidad española.

El carácter que se ha querido imprimir a esta obra es de guía de acceso rápido a varios de los principales problemas que la Ingeniería de Organización aborda con éxito. Si bien es imposible la exhaustividad, como se ha comentado anteriormente, creemos que la representatividad que la obra alcanza al abordar diferentes escenarios es un esfuerzo destacable, antes no alcanzado.

También merece especial consideración el capítulo primero del libro, en el que se sientan las bases de fundamento que defienden la Ingeniería de Organización como disciplina diferenciada en el ámbito de la Organización de Empresas. El discurso mantenido a lo largo del capítulo es un discurso recurrente que se defiende en diversos foros, tales como reuniones científicas, concursos de oposición del profesorado, comisiones y subcomisiones técnicas. De hecho, todos los autores son además miembros de la Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Organización en España (ADINGOR). Por todo ello, entendemos que dicho contenido se convertirá en un elemento de referencia para el futuro de esta Ingeniería.

Por último, sólo destacar que la metodología utilizada en el libro y el énfasis en el análisis de los problemas que se plantean y en la discusión de los aspectos relevantes de los mismos emana de la experiencia profesional de sus autores, adquirida y acumulada a lo largo de ya muchos años en la realización de múltiples proyectos de investigación y transferencia de tecnología con numerosas entidades e instituciones públicas y privadas. En este momento no nos queda más que agradecer a todos ellos su confianza en el grupo de investigación de nombre Ingeniería de Organización de la Universidad de Sevilla, al cual pertenecen sus autores.

Los Autores

ciones, esta disponibilidad de alojamiento no se puede utilizar en un periodo de tiempo posterior. Este mismo problema se pone de manifiesto en las empresas de alquiler de coches, en el uso de los medios de transporte, etc.

El problema de disponer de una capacidad de prestación del servicio fija y al mismo tiempo hacer frente a una demanda del servicio variable, conducen al intento de optimizar el uso de los recursos disponibles, maximizando el beneficio de las empresas del sector servicios.

Las técnicas de *Yield Management* se iniciaron a finales de los años 70, centrándose en el sector aéreo con el objetivo de vender cada asiento de un avión al cliente adecuado, a la tarifa apropiada para él, permitiendo con ello la maximización de los ingresos de la compañía aérea. Actualmente estas técnicas se están introduciendo en el sector hotelero, aunque en un nivel que todavía no es comparable con el de la aviación civil.

Yield Management (YM) es un conjunto de técnicas utilizadas para gestionar los recursos de la empresa. Es una metodología que puede ayudar a las empresas del sector servicios a colocar en el mercado la correcta unidad de inventario a la clase de cliente adecuado, en el instante preciso y al precio conveniente. YM ayuda en la toma de decisiones, aportando el modo de conseguir que las categorías de inventario similares se ajusten a la demanda existente para maximizar los ingresos o beneficios. En definitiva, el problema se reduce a cuánto y a qué precio se debe vender en cada segmento de mercado.

El concepto en que se fundamentan las técnicas de YM se puede entender con facilidad centrándose en el sector aéreo. *Yield* se refiere a los ingresos por miles de plazas existentes o a los ingresos por miles de pasajeros. Las compañías aéreas normalmente ofrecen distintos tipos de servicios, tales como Primera (First), Comercial (Business) y Turista (Economy). Preferirían llenar sus aviones con clientes de primera clase, pero esto raramente ocurre, por lo que tratan de cubrir las plazas libres ofreciendo otros billetes diferentes. Hay que llegar a un punto de equilibrio entre el uso máximo de la capacidad, que sería lo deseable, y la venta de los billetes al precio máximo. Debido a que las unidades que forman el inventario en las compañías aéreas son perecederas, un asiento vacío en un vuelo tiene asociado un coste de oportunidad. Las compañías aéreas deben decidir cuánto descontar al precio de los billetes para asegurar su venta, y al mismo tiempo estar seguros de que dejan suficientes asientos libres para la venta a los pasajeros que lleguen a última hora con intención de ocupar asientos de primera clase.

Muchas compañías aéreas han abordado este problema con YM, combinando la gestión del inventario de asientos con herramientas de estudio de

precios, para alcanzar un ingreso máximo. Como se pueden obtener unos beneficios superiores, YM se convierte en una opción muy atractiva. El sector aéreo fue el primero en aplicar YM para la distribución de la capacidad, con lo que alcanzó gran popularidad. Muchos informes de compañías aéreas reflejan que ellas han obtenido aumentos en las cifras de ingresos del 5% o más, tras implantar YM.

Otras actividades, principalmente del sector servicios, como la gestión hotelera, alquileres de coches o transporte de mercancías, tras el éxito del YM en las líneas aéreas, han intentado adaptar este sistema a su funcionamiento. En estos casos, el concepto de *Yield* pasaría a ser ingresos por unidad de inventario disponible. Por ejemplo, para un hotel se mediría como el ingreso por habitación disponible. Todas estas actividades se diferencian por sus características propias. Sin embargo, todas comparten una serie de características: la capacidad es fija, sus mercados se pueden segmentar y, además, presentan unas demandas variables para cada tipo de servicio ofertado.

Cuando las empresas que gestionan las actividades del sector servicios (tales como el transporte, los hoteles, los servicios de salud, las compañías de espectáculos y los restaurantes), presentan una restricción en su capacidad, su éxito es función de la habilidad para gestionar el uso de su capacidad eficientemente. En este tipo de empresas, YM se identifica con la maximización de los ingresos debido a los costes fijos tan altos que presentan. El coste marginal de vender otro asiento, o transportar otro pasajero, es despreciable comparado con el ingreso marginal que se produce.

4.2. Requisitos y sectores de aplicación

En este apartado se comentan tanto los requisitos necesarios para la aplicación de estas técnicas, como un esquema de los distintos componentes que las integran y sus posibilidades en el sector servicios.

4.2.1. Requisitos

La técnica YM, de conformidad con lo expuesto por Kimes (1989), es apropiada cuando se dan las siguientes circunstancias:

1. La empresa opera con capacidad fija.
2. La demanda puede ser claramente segmentada en conjuntos diferenciados.

3. El inventario es perecedero.
4. El producto se puede vender por adelantado.
5. La demanda fluctúa suficientemente.
6. Los costes marginales de venta son bajos y los posibles costes de adición de capacidad extra son altos.

Estas características suelen tenerlas las empresas en las que se aconseja la utilización de YM. Sin embargo, conviene analizar con mayor detenimiento cada una de ellas, para así alcanzar un mayor grado de conocimiento de esta técnica.

Capacidad fija

La aplicación del YM está centrada en empresas que presentan esta característica. Es apropiada para las empresas que no pueden adaptar rápidamente su capacidad ante un eventual cambio de demanda. Por ejemplo, si todas las habitaciones de un hotel están ocupadas, es muy difícil añadir una nueva, aunque el cliente se pueda alojar en otro hotel que la empresa tuviese en la misma ciudad. Para las compañías aéreas, si todos los asientos de un vuelo están ocupados, un nuevo viajero sólo podría viajar en un vuelo posterior. Por estas razones se necesita capacidad fija, aunque con cierta flexibilidad.

Mercado segmentado

Para que YM sea efectivo, la empresa debe poder segmentar el mercado en diferentes tipos de clientes [Ladany (1976)]. Por ejemplo, las compañías aéreas distinguen entre clientes con distinto grado de sensibilidad en el binomio tiempo-precio. Esto se pone de manifiesto, en el caso que nos ocupa, si se le ofrece por ejemplo a un cliente la vuelta el sábado por la noche para de ese modo obtener mayor descuento en el precio. Básicamente se debe poder identificar qué clientes son los más sensibles a un cambio en el precio por un cambio de servicio, por lo que se desarrollarán distintas estrategias de mercado para los distintos tipos de clientes.

Inventario perecedero

Uno de los factores que diferencian las empresas de servicios de los demás tipos de empresas es el tipo de inventario. En las empresas de servicios, el inventario es perecedero. Además, cuando la compañía de servicios tiene capacidad limitada, el problema se acentúa al no ser posible un aumento de dicha capacidad. Los asientos no vendidos en un vuelo, las

habitaciones libres de un hotel o los coches sin alquilar, representan unidades de inventario perdidas. Si una compañía puede minimizar este inventario caducado obtendrá mayores ingresos y por tanto mayores beneficios.

Venta anticipada

Una de las prácticas más comunes en este tipo de empresas es el uso de un sistema de reservas en el que las unidades del inventario son vendidas antes de su uso. Este sistema de reservas permite a la empresa operar con mayor seguridad, al saber que su capacidad podrá ser usada en el futuro. Pero cuando el producto se vende por adelantado, aparece otro inconveniente. El gestor de la empresa debe decidir si acepta una reserva de un cliente a un precio menor, o bien espera a que aparezca un cliente que pague el precio actual. La previsión de la demanda proporciona, anticipadamente, el tamaño de los distintos segmentos de mercado y el precio de cada uno de ellos. Este procedimiento necesita información interna de la empresa y un estudio global del mercado.

Fluctuación de la demanda

La mayoría de las empresas deben responder a variaciones de la demanda. La técnica YM se aplica potenciando el uso del servicio en las épocas de baja demanda (bajando el precio), o incrementando los ingresos cuando la demanda es elevada (aumentando el precio). Si se prevén convenientemente los valles y picos de demanda, la gestión podrá acomodarse a ellos. Se deben ofertar distintos precios a los distintos clientes como respuesta a los cambios de demanda.

Coste marginal de venta bajo y de aumento capacidad alto

Para que una aplicación de YM sea efectiva, el coste de vender una unidad adicional de inventario debe ser bajo, al mismo tiempo que el coste marginal de inversión del incremento de capacidad debe ser alto. Éste suele ser el caso de empresas con claras restricciones de capacidad, en el sentido de que operar con capacidad adicional suele ser bastante costoso y, sin embargo, el coste de la venta de una unidad de capacidad existente suele ser relativamente barato.

4.2.2. Sectores de aplicación

Los distintos sectores que se van a considerar presentan peculiaridades en la duración del servicio prestado y en la cuantía del precio percibido por

la prestación del servicio, por lo que son susceptibles de ser gestionados mediante sistemas de *Yield Management* (Withiam, 2001). Estas características pueden esquematizarse del modo que se muestra en la Figura 4.1.

Según se muestra en la Figura 4.1 los sectores que normalmente cumplen los requisitos expuestos en el apartado anterior son los que aparecen en el cuadrante superior derecho (hoteles, aviones, etc.) al presentar un servicio con una duración prefijada y con un precio variable. Los sectores situados en el cuadrante superior izquierdo (cines, estadios, auditorios, etc.) presentan un precio fijo para un servicio de duración prefijada. Los sectores del cuadrante inferior izquierdo (restaurantes, museos, etc.) tienen unos precios fijos para una duración aleatoria. El cuadrante que resta, el inferior derecho, engloba a sectores como el hospitalario, que presentan precios diferentes (centros públicos y privados) y se desconoce la duración de la estancia del cliente o paciente, en este caso.

Como separación entre los distintos cuadrantes se utilizan líneas discontinuas para resaltar que muchos sectores no pertenecen exclusivamente a uno de ellos, sino que por sus características pueden pertenecer a más de uno.

La aplicación de las técnicas YM se ha centrado generalmente en las empresas que caracteriza el cuadrante superior derecho, ya que al presentar una duración prefijada, lo que se intenta es maximizar los ingresos obtenidos de acuerdo a la determinación del precio de los servicios.

Conviene comentar brevemente los dos conceptos que se han usado para la distinción de los distintos sectores. En cuanto a la duración del servicio,

		Precio	
		Fijo	Variable
Duración	Predeterminada	Salas de Cine Estadios Auditorios	Hoteles Avión Alquiler de Coches Líneas de Cruceros
	Aleatoria	Restaurantes Cursos Museos Parques de Atracciones	Hospitales

Figura 4.1. Sectores según duración y precio del servicio

es necesario que la empresa preste especial atención al tiempo que los clientes utilizan cada servicio. Para ello se debe cuantificar con exactitud su magnitud, disminuir las incertidumbres de las llegadas y reducir el tiempo muerto existente entre clientes (periodos de espera). Se puede definir la duración como una medida del servicio en términos de tiempo (número de noches o de horas) o de eventos (número de comidas, de vuelos, etc.). Sin embargo, es más aconsejable medir la duración en tiempo que en número de eventos para poder llevar a cabo un mejor control.

En los sectores en los que más se aplican las técnicas YM, el precio varía según el instante de la reserva, las restricciones impuestas, etc. Como contraste, los sectores que aparecen en la mitad izquierda de la Figura 4.1, operan con clientes que, para el mismo servicio y en el mismo instante, presentan idéntico precio. Las empresas ofrecen un repertorio de precios entre los que deben elegir los clientes. La determinación de los mejores precios es difícil debido a que se suele carecer de información sobre las elasticidades para los distintos precios.

En la Tabla 4.1 se recogen de forma esquemática, los distintos autores que han trabajado en las técnicas YM clasificados conforme a los sectores en los que se han centrado sus trabajos y la fecha de publicación de los trabajos.

Tabla 4.1. Referencias del uso de las técnicas YM en distintos sectores.

Sector	Autores
Transporte aéreo	Rothstein (1971), Littlewood (1972), Belobaba (1987, 1989), Brumelle <i>et al.</i> (1990), Curry (1990), Williamson (1992), Smith <i>et al.</i> (1992), Weatherford y Bodily (1992), Griffin <i>et al.</i> (1995), Kasilingam (1996), Botimer y Belobaba (1999), Coughlan (1999) y McGill y Van Ryzin (1999)
Hoteles	Ladany (1976), Orkin (1988), Relihan (1989), Kimes (1989), Bitran y Mondschein (1995), Baker y Collier (1999, 2003), Jones (1999), Luciani (1999), Choi & Cho (2000) y Withiam (2001)
Alquiler de coches	Caroll y Grimes (1995) y Geraghty y Johnson (1997)
Transporte ferroviario	Campbell y Morlok (1994), Strasser (1996) y Ciancimino <i>et al.</i> (1999)
Restaurantes	Kimes (1998), Bertsimas y Shioda (2003)
Internet	Paschadilis y Tsitiklis (2000)
No lucrativos	Metters y Vargas (1999)
Otros	Arthur Andersen (1997)

4.3. Modelos de resolución

Las técnicas utilizadas se diferencian en base a la naturaleza del modelo seleccionado por lo que se pueden clasificar en tres categorías: curvas límite, modelos económicos y programación matemática. Una de las características más influyentes para la elección del modo de aplicar YM es que se trata de un problema que se va a tener que resolver muchas veces, casi a diario, por lo que el método de resolución debe ser eficiente, es decir rápido y con un grado de exactitud razonable. Alcanzar la solución óptima es deseable pero no se considera tan importante como conseguir un buen grado de exactitud con un procedimiento de resolución computacionalmente adecuado. Hasta comienzos de los años 90, los métodos más usados fueron los modelos de ingresos marginales y las curvas límite.

4.3.1. Método de las curvas límite

Una de las claves para el correcto funcionamiento de un hotel es que los gestores tengan un buen conocimiento del modo de comportarse de los clientes ante las distintas categorías o clases de alojamiento que se les ofrecen. En relación a este concepto surgió una forma de operar denominada curvas límite y desarrollada por Relihan (1989). Es un modelo que no necesita mucho cálculo matemático, por lo que su utilización se ha hecho muy popular.

Antes de entrar en materia conviene analizar la forma de actuar de la demanda. Los clientes de las empresas de servicios suelen agruparse en dos conjuntos, los que usan el servicio con una mayor necesidad, por ejemplo por razones de trabajo, y los que lo hacen con una menor necesidad, por ejemplo relacionado con el ocio. Cada uno de dichos conjuntos tiene un comportamiento diferente ante el precio y por el instante en que adquieren el servicio. De la experiencia se deduce que los clientes de ocio adquieren el servicio con cierta antelación, como sucede con unas vacaciones planificadas. Los clientes de trabajo suelen necesitar el servicio en fechas inmediatas. En la Figura 4.2 se refleja el comportamiento de estos dos grupos, mostrándose los días de antelación al uso del servicio, con que realizan la reserva cada uno de ellos.

Por tanto, por un lado, el cliente de negocios puede encontrar en poco tiempo una habitación en un pico de demanda y a un precio elevado; y por otro, el cliente de ocio adquiere una habitación por adelantado a un precio barato. De esta forma el gestor de la empresa consigue una mayor ocupación con unos beneficios mayores.

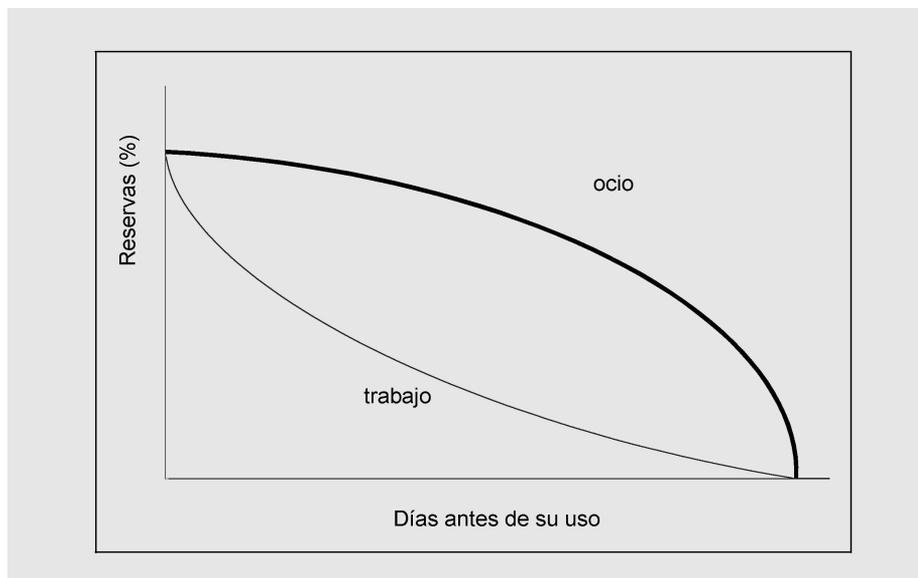


Figura 4.2. Comportamiento de los clientes de dos categorías.

Una vez expuestas algunas características de la demanda se explica, mediante un ejemplo, cómo se opera con el método de las curvas límite. Lo primero que se debe hacer es dibujar las curvas límite. Para ello la empresa debe agrupar los datos históricos de las reservas pasadas, recogiendo las reservas de 60 o 90 días antes de una fecha dada. Con estos datos se representa la curva de la demanda agregada. Normalmente se obtienen diferentes curvas límite para los distintos días de la semana y para las distintas temporadas del año. A continuación se calcula un rango de desviación de la media que podría ser $\pm 0,25\%$ o $\pm 2\%$, con lo que se obtendrían una serie de curvas paralelas. Finalmente se tiene una banda limitada por curvas límite.

Para los distintos días se representa el nivel de ocupación al que se encuentra el servicio. Mientras estos niveles estén comprendidos dentro de la banda definida por las curvas límite, estaremos en la situación ideal. Sin embargo, en el momento en que la curva se salga de estos límites, se deben crear o anular algunas de las categorías existentes. Si la demanda es menor de la que se previó, se deberán incluir nuevas categorías en la oferta. En el ejemplo de la Figura 4.3, cuando nos encontramos a 45 días del uso del servicio y las reservas son inferiores a lo adecuado (recogido en la franja oscurecida) se deberían crear nuevas categorías. Al crear estas categorías a precios menores, es de prever que las reservas vuelvan a la zona intermedia.

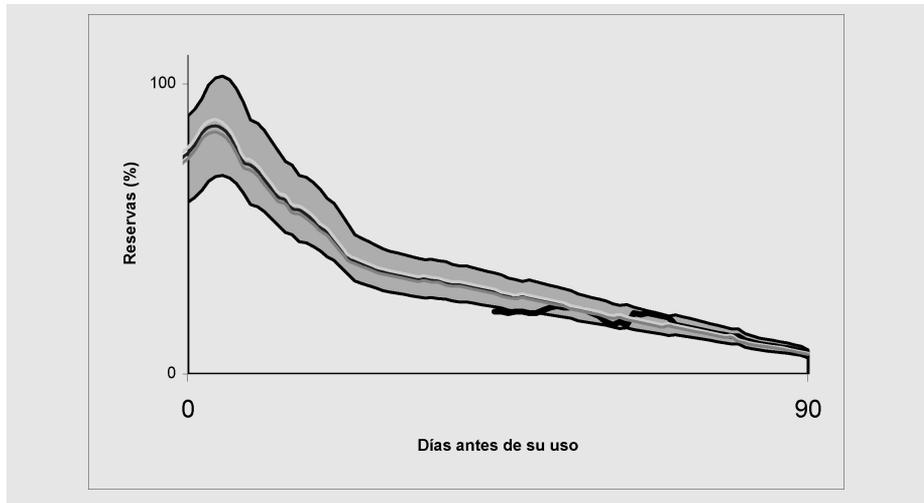


Figura 4.3. *Curvas límite en el día 45 antes del servicio.*

Si la demanda fuese mayor deben eliminarse algunas categorías. Al llegar el día del uso del servicio, habrán ido apareciendo y desapareciendo categorías en función a las reservas existentes. Todo este proceso se puede ver representado en la Figura 4.4.

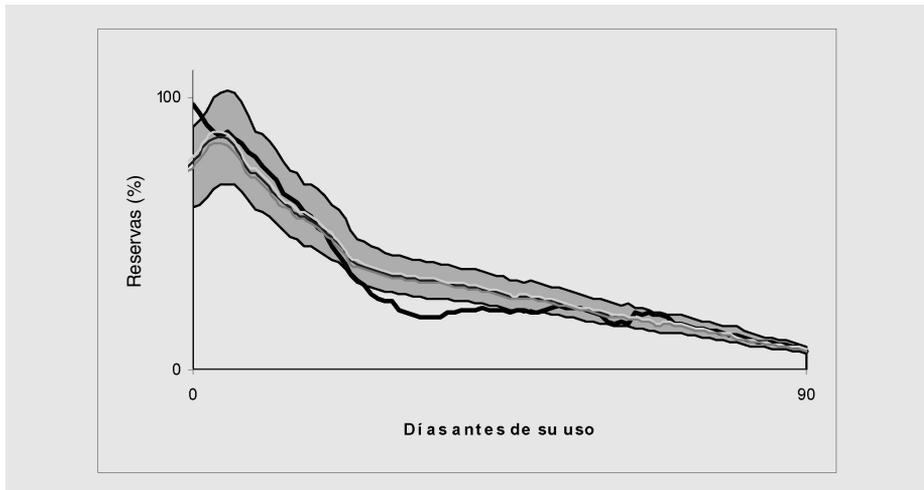


Figura 4.4. *Curvas límite el día del servicio.*

Este método usa curvas límite obtenidas por demandas agregadas más que por demandas por categorías, debido al hecho de que se van creando y eliminando algunas de ellas.

El modo de operar es estático y no necesita calcular la demanda, es simple de usar y la experiencia demuestra que el resultado es aceptable. La existencia de los grupos crea distorsiones al influir de manera muy notable en la curva de la demanda.

4.3.2. Métodos económicos

A continuación se describen distintos modelos sobre la forma de segmentar el inventario en las distintas categorías desde un punto de vista económico. Se incluye en el desarrollo como posibilidades alternativas, la existencia o inexistencia de correlación entre las demandas de los distintos segmentos.

4.3.2.1. Modelo de distribución del inventario

Con este modelo se pretende determinar *a priori* cuántas unidades de inventario deberán asociarse a cada categoría. El primer estudio sobre este enfoque lo hizo Littlewood (1972). En esta primera aproximación, se divide el inventario en dos posibles categorías, una d con descuento y otra f que ofrece los servicios sin descuento. Por lo tanto, se debe poner límite a la cantidad ofrecida con descuento.

El resto será ofertado a la categoría de precio superior. Se considera como hipótesis de partida que el inventario con descuento se vende antes que el sin descuento, y que todas las reservas son utilizadas, es decir, ninguna reserva se cancela.

Los parámetros que intervienen son:

q_T : capacidad total fija.

X : variable aleatoria que estima la demanda del número de unidades de inventario sin descuento.

r_d : ingresos producidos por una unidad con descuento.

r_f : ingresos producidos por una unidad sin descuento.

La variable a determinar es,

q_d : número de unidades de inventario con descuento.

Se deben seguir ofreciendo unidades de inventario de la categoría con descuento mientras se cumple la siguiente condición:

$$r_d \geq r_f \cdot \Pr[X > q_T - q_d] \quad (4.1)$$

Siendo \Pr la probabilidad, en este caso, de que al llegar el momento de ofrecer el servicio no se tenga disponibilidad para atender la petición.

La consecuencia es que se continuará ofreciendo un servicio más con descuento mientras los ingresos con descuento sean mayores, o iguales, a los ingresos esperados para la categoría de precio superior (sin descuento).

Otra interpretación sería que en el momento en que la demanda de servicios con descuento alcance q_d , entonces \Pr sería la proporción esperada de días en que son rechazados clientes para la categoría de precio superior. En esta situación el sistema no actuaría eficientemente, habida cuenta que hay servicios ofertados a r_d que se podrían ofertar a r_f .

De esta regla se obtuvo un principio usado en las compañías aéreas: el límite óptimo de reservas es el mayor valor de q_d para el que la probabilidad no exceda de la relación entre los precios de la categoría superior y los precios con descuento. A modo de ejemplo, se puede afirmar que al operar con precios con descuento, entre el 30% y el 60% del precio del billete sin descuento, la regla afirma que se rechazarían uno o más clientes sin descuento en una cantidad de vuelos entre el 30% y el 60%, al existir una demanda con descuento elevada. Esta proporción es superior a la que se produce realmente, debido al margen de seguridad con que operan las compañías.

4.3.2.2. Modelo del ingreso marginal

Como resulta evidente en cualquier instante, las empresas deberían tener un número de unidades de inventario que potenciara la demanda de consumidores de alto poder adquisitivo. Hay que alcanzar una distribución tal que el ingreso esperado con una venta adicional en la gama alta sea igual al nivel actual de ingresos que se tiene en la gama inferior. Esta distribución determina el número óptimo de servicios a asignar a cada categoría. La distribución óptima del inventario se alcanza cuando el ingreso marginal de la venta del último servicio en una clase sea el mismo que el que se produce para cualquier otra [Belobaba (1987), (1989)]. Este modelo de ingreso marginal esperado por servicio, se conoce con las siglas *EMSR*, correspondiente a su nombre en inglés (*Expected Marginal Seat Revenue*).

Si se observan algunas características relacionadas con el reparto del inventario, se aprecian las facetas probabilística y dinámica que posee este planteamiento:

6.3.1. Preferencias reveladas (RP)

Cuando se utilizan preferencias reveladas, es el propio individuo encuestado el que especifica los niveles de los atributos de las alternativas que le son disponibles y el que emite una valoración sobre el perfil construido. En términos del caso ejemplo, el encargado en cada nodo de la cadena logística habría de caracterizar a sus diferentes proveedores de servicios y asignarles una puntuación a cada uno.

Con este procedimiento de recogida de información se obtiene sólo una observación por individuo, o muy pocas en el caso más favorable, precisamente la consistente en la *revelación* de su experiencia real (en el ejemplo, la valoración que el encargado hace de los proveedores que tiene o ha tenido su empresa).

En la Figura 6.4 se representa una observación de preferencias reveladas para aplicación de un modelo de estimación lineal, de regresión lineal, por ejemplo. Como se puede ver, el encargado percibe a su proveedor como de calidad superior a la media del sector, con coste igual a la media, etc. y le asigna una valoración de ocho en la escala 0-10.

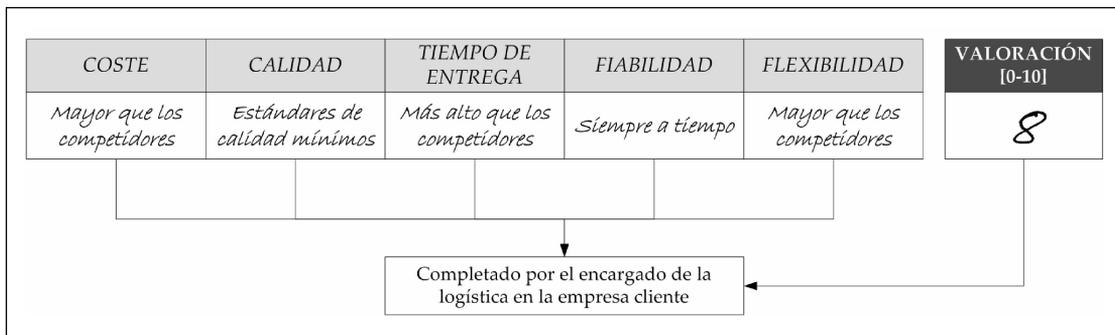


Figura 6.4. *Preferencia revelada para aplicar modelo de estimación lineal.*

Del mismo modo, en la Figura 6.5 se representa una observación de preferencias reveladas pero para aplicación de un modelo de estimación no lineal, de entre los que destacan, como se ha dicho, los modelos logit de tipo simple. En este caso, el encargado de la logística elige a su proveedor realizando una selección entre varios proveedores alternativos. El encargado vuelve a describir a cada proveedor en términos de su experiencia real con ellos, marcando cuál se ha decidido por contratar (*elección discreta*) o con qué porcentaje requerirá los servicios de estos diferentes proveedores (*asignación frecuencial*) u ordenando su preferencia por cada uno de ellos (*asignación ordinal*).

Descripción de los proveedores disponibles al encargado:

	COSTE	CALIDAD	TIEMPO DE ENTREGA	FIABILIDAD	FLEXIBILIDAD	VALORACIÓN [Proveedor elegido]
Proveedor A	Mayor que los competidores	Supera estándares calidad mínimos	Más bajo que los competidores	Algunos retrasos	Menor que los competidores	<input type="checkbox"/>
Proveedor B	Menor que los competidores	Estándares de calidad mínimos	Más alto que los competidores	Siempre a tiempo	Mayor que los competidores	<input checked="" type="checkbox"/>

Completado por el encargado de la logística en la empresa cliente

Figura 6.5. Preferencia revelada para aplicar modelo de estimación no lineal.

La ventaja más destacada del uso de preferencias reveladas es que se trata de decisiones que *realmente* se han hecho por parte de los agentes decisores, en el ejemplo, los encargados logísticos de las empresas. Sin embargo, su empleo para describir y predecir el comportamiento de una población adolece de ciertas limitaciones, estudiadas fundamentalmente desde los años ochenta en trabajos como Morikawa (1989) o Brownstone *et al.* (2000). A continuación se muestran las principales:

- De cada individuo del que se recoge información sólo se obtiene un número limitado de observaciones, precisamente las que se corresponden con su comportamiento real. En el ejemplo, de cada encargado se obtiene sólo la valoración y las características de los proveedores con los que haya contratado algún servicio.
- El individuo encuestado puede tender a justificar las decisiones que ha realizado en la práctica, dando lugar a un probable sesgo de sobrevaloración de las alternativas que se han elegido respecto al resto de opciones.
- Tampoco es posible con este tipo de preferencias el análisis del impacto de atributos nuevos no presentes actualmente en las alternativas disponibles. Por ejemplo, la inclusión los nuevos servicios de seguimiento vía GPS (tracking y tracing) como característica de los proveedores.
- También se puede dar con esta tipología de preferencias el caso de que el atributo más importante sea el menos significativo, pues, si efectivamente es el más importante, los individuos habrán elegido entre las alternativas de acuerdo a este atributo y, por tanto, el nivel revelado del atributo en las alternativas disponibles será de orden similar.

- Por último, una de las principales desventajas del uso de datos RP, y exclusiva de su empleo para estimar modelos no lineales de preferencias, es que el propio individuo debe caracterizar todas las alternativas que le son disponibles. Para el caso en el que el individuo selecciona sólo una de ellas (elección discreta)², se tiene que éste ha de caracterizar también a las alternativas que no han sido elegidas, proceso que se espera, por lo general, que sea poco exacto.

Debido a estas desventajas, existen motivos suficientes que hacen deseable que las alternativas que valoran los encuestados no tengan siempre que existir o haber existido en la realidad, siendo este el punto de partida del tipo de preferencias que se introduce en la sección siguiente.

6.3.2. Preferencias declaradas (SP)

En la búsqueda por superar las desventajas asociadas a las preferencias reveladas, se plantea la aplicación de modelos de estimación, lineales y no lineales, a datos consistentes en valoraciones de los encuestados sobre combinaciones posibles de niveles de los atributos, independientemente de que éstas existan o hayan existido en la práctica. En este tipo de estudio los encuestados *declaran* cuál sería su comportamiento en este escenario de alternativas posibles.

En la Figura 6.6 y la Figura 6.7 se muestran ejemplos de observaciones de preferencias declaradas para el caso de aplicar, respectivamente, modelos de estimación lineales y no lineales al caso ejemplo anterior de valoraciones de proveedores de servicios logísticos.

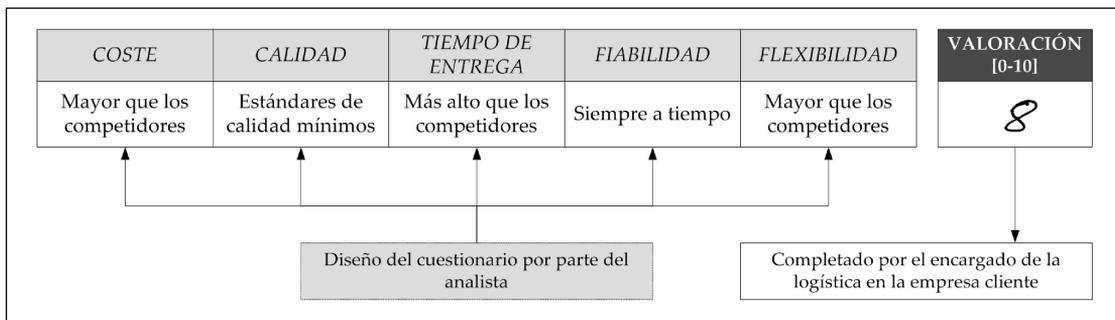


Figura 6.6. *Preferencia declarada para aplicar modelo de estimación lineal*

² Esta situación es la que implica, a priori, menor atención por parte de los encuestados a las alternativas que no resultan elegidas, en contraste con los procesos de valoración de alternativas consistentes en la asignación de frecuencias o de un orden entre ellas.

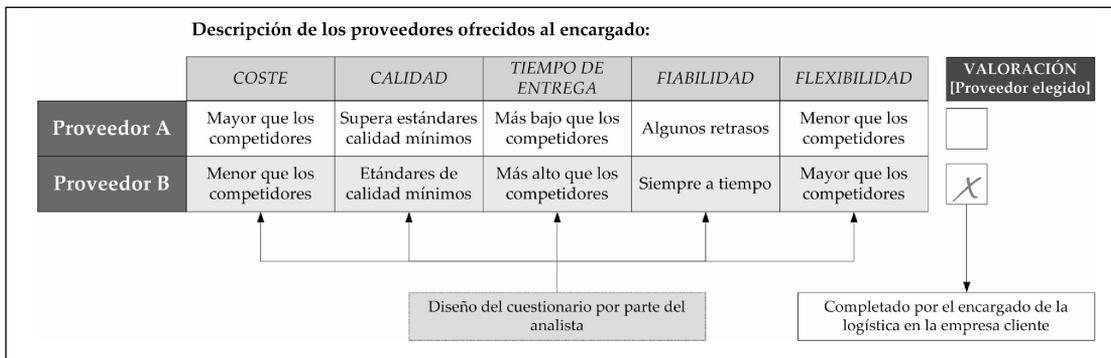


Figura 6.7. Preferencia declarada para aplicar modelo de estimación no lineal.

En este escenario, la configuración de los perfiles que valoran los individuos es controlable por el analista, por medio de un proceso de *diseño de experimentos* al que se vuelve más adelante en el capítulo.

Con el empleo de preferencias declaradas se soslayan efectivamente algunas de las limitaciones propias de las preferencias reveladas de la sección anterior, si bien aparecen otras:

- En primer lugar, lo que los individuos dicen que harán no es lo mismo que lo que hacen cuando realmente tienen que decidir. De hecho, lo que los individuos declaran que harían podría llegar a estar incluso influenciado por lo que el analista espera de las respuestas de los individuos.
- Además, los individuos encuestados pueden perder la perspectiva del experimento si las alternativas que se les ofrecen no están relacionadas de alguna forma con su experiencia actual o pasada.
- Igualmente, y para evitar procesos de recogida de información ineficientes, se hace necesario seleccionar las combinaciones de niveles de los atributos que son potencialmente aplicables y que no constituyen contrasentido alguno.

Por otro lado, entre las ventajas que introduce el empleo de preferencias declaradas se pueden destacar las dos siguientes:

- Primero, que los cuestionarios que responden los individuos pueden ser contruidos para contener tanta variación en los atributos como se considere oportuno, aplicando las técnicas de diseño de experimentos, de tal forma que la estimación de los pesos de los atributos en las decisiones de los individuos sea lo más precisa posible.

- Y segundo, que el empleo de preferencias declaradas permite la estimación de modelos cuando no se dispone de datos de preferencias reveladas, por ejemplo, cuando se consideran alternativas que no han existido antes o cuando se incluyen atributos nuevos para caracterizar a las alternativas existentes.

En principio puede parecer que no está claro qué tipo de recogida de datos es el más adecuado. En efecto, esta decisión depende seguramente de factores como el problema en estudio, el presupuesto disponible en la toma de datos o la accesibilidad a la población encuestada. En este sentido, se han desarrollado en la literatura técnicas de estimación basadas en el empleo conjunto en el mismo modelo de preferencias reveladas y declaradas, obteniendo resultados que mejoran los asociados a la utilización exclusiva de datos de preferencias reveladas o declaradas.

Una explicación breve de esta sinergia, sobre la que se abunda en la sección 6.7, es que la presencia de datos revelados contribuye a que el problema permanezca anclado a la realidad bajo estudio, por consistir en decisiones reales, mientras que la inclusión de datos declarados permite una exploración más exhaustiva y profunda del perfil decisor de los distintos encuestados, al diseñar tanta variación en los atributos como se estime oportuna.

6.4. Modelos lineales de preferencias

La primera aproximación al análisis de las preferencias de una población puede ser el empleo de un modelo de estimación lineal, de entre los que destacan los de regresión lineal o de análisis conjunto sin comparaciones, para cuantificar el peso que tiene cada característica de las alternativas disponibles en las preferencias mostradas por dicha población.

En el caso ejemplo anterior consistiría en el cálculo del peso que tiene cada característica de los proveedores de servicios logísticos (coste, calidad, tiempo de entrega, fiabilidad y flexibilidad) en la satisfacción mostrada por los encargados de cada empresa cliente. Así, proponiendo una expresión lineal en los parámetros para tal función de satisfacción o utilidad, se tiene que:

$$S_i^m = \beta_{\text{coste}} \text{Coste}_i^m + \beta_{\text{calid}} \text{Calid}_i^m + \beta_{\text{time}} \text{Time}_i^m + \beta_{\text{fiab}} \text{Fiab}_i^m + \beta_{\text{flex}} \text{Flex}_i^m + \varepsilon_i^m, \quad \forall i, \forall m$$

Donde S_i^m es la valoración que el encargado m hace del proveedor de servicios logísticos i y $x_i^m = (\text{Coste}_i^m, \text{Calid}_i^m, \text{Time}_i^m, \text{Fiab}_i^m, \text{Flex}_i^m)$ es el

vector que contiene los valores de los atributos que definen a dicho proveedor.

Los pesos de los atributos que el modelo calcula son, $\hat{\beta}_{coste}$, $\hat{\beta}_{calid}$, $\hat{\beta}_{time}$, $\hat{\beta}_{fiab}$, $\hat{\beta}_{flex}$, y los datos de que se dispone para llevar a cabo su estimación son las valoraciones de todos los individuos ($S_i^m \forall i, \forall m$) y todos los perfiles evaluados ($\mathbf{x}_i^m \forall i, \forall m$). El tratamiento numérico de los atributos de tipo cualitativo, que son todos en este ejemplo (véase Tabla 6.1, pág. 246), se consigue mediante su adecuada codificación, que puede ser *por efectos*, *fic-ticia* u *ortogonal*, empleándose más adelante la primera.

Los términos $\varepsilon_i^m \forall i, \forall m$ se introducen en la formulación del modelo para hacer posible la estimación de los pesos, y se interpretan como la desviación entre lo que explican los atributos y las valoraciones observadas de los individuos. De hecho, el criterio de cálculo de los pesos más utilizado en la tipología de modelos lineal es minimizar el cuadrado de estas desviaciones, esto es, resolver el siguiente problema:

$$\begin{aligned} \text{MIN} \quad & \sum_m \sum_i (S_i^m - \hat{S}_i^m)^2 \\ \text{s.a.} \quad & \hat{S}_i^m = \hat{\beta}_{coste} Coste_i^m + \hat{\beta}_{calid} Calid_i^m + \hat{\beta}_{time} Time_i^m + \hat{\beta}_{fiab} Fiab_i^m + \hat{\beta}_{flex} Flex_i^m \\ & \hat{\beta}_{coste}, \hat{\beta}_{calid}, \hat{\beta}_{time}, \hat{\beta}_{fiab}, \hat{\beta}_{flex} \text{ libres} \end{aligned}$$

La forma habitual de proceder a realizar las valoraciones de cada perfil es mediante valoraciones numéricas o respuestas en escalas de tipo *Likert*. La naturaleza de estas valoraciones, que asumen implícitamente la misma escala de preferencia para toda la población encuestada, y la simplicidad de la estructura del modelo, constituyen las dos principales limitaciones de esta metodología lineal, lo que viene a justificar, en parte, el empleo de los modelos no lineales que se presentan en la sección siguiente.

6.5. Modelos no lineales de preferencias

La metodología de tipo no lineal de construcción de modelos descriptivos y predictivos de las preferencias observadas se ha desarrollado casi en su totalidad a partir de los años setenta y con el objetivo último de acercarse a la realidad del proceso decisor individual más que los modelos lineales expuestos en la sección anterior.

El criterio que se ha utilizado en este capítulo, en cuanto a nomenclatura, varía con relación a los anteriores con el objeto de representar notación vectorial, material y escalar. Así, se emplea la negrita para vectores y

matrices, si bien las matrices siempre se representan con mayúsculas o letra griegas, mientras que se utiliza la cursiva no negrita para escalares.

6.5.1. Estructura básica

La observación básica en este tipo de modelos es la decisión realizada por un individuo al considerar simultáneamente dos o más alternativas (*conjunto de decisión*). La diferencia fundamental respecto al caso lineal es que las valoraciones no se realizan de cada alternativa por separado, sino al considerar simultáneamente todas las que forman parte del conjunto de decisión.

Siguiendo el caso ejemplo anterior, ya en la Figura 6.7 se ha incluido un posible conjunto de decisión en el que se pide al encargado que elija uno de los dos perfiles de proveedores de servicios que se le ofrecen, mostrándose en la Figura 6.8 dicho conjunto con los niveles de los atributos codificados por efectos e incluyendo los parámetros que estima el modelo.

Al comparar un proveedor con otro, el encargado ha de emitir algún tipo de juicio, selección de una alternativa (como en el caso de la Figura 6.8), ordenación de las alternativas, asignación de porcentajes de preferencia, etc., notándose que no es necesario en este caso asumir que todos los individuos encuestados otorgan el mismo significado a la escala propuesta para la evaluación de las alternativas, pues ésta se relativiza al estar las valoraciones basadas en comparaciones. La escala es idéntica entre individuos en lo respectivo a la diferencia de utilidades.

El objetivo de estos modelos no lineales es también encontrar unos coeficientes que ponderen a cada uno de los atributos en su contribución al

Descripción de los proveedores ofrecidos al encargado:								
	COSTE		CALIDAD	TIEMPO		FIABILIDAD	FLEXIBILIDAD	
	C_1	C_2	Q_1	T_1	T_2	R_1	F_1	F_2
Proveedor A	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1
Proveedor B	-1	-1	-1	1	0	1	0	1
Parámetros estimados	β_{C1}	β_{C2}	β_{Q1}	β_{T1}	β_{T2}	β_{R1}	β_{F1}	β_{F2}

VALORACIÓN [Proveedor elegido]
<input type="checkbox"/>
<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 6.8. Información contenida en un conjunto de decisión.

índice de satisfacción de cada alternativa. Existen, sin embargo, existen dos aspectos que diferencian el proceso para realizar dicho cálculo respecto al caso lineal y que pretenden introducir mayor realismo en los modelos:

En primer lugar, en lo relativo a la relación funcional que se establece entre los valores de los atributos de una alternativa y la utilidad a ella asociada. Un ejemplo de esta relación es la siguiente expresión de la utilidad lineal en los parámetros que caracterizan al proveedor i que forma parte del conjunto de decisión m (Figura 6.8):

$$S_i^m = \beta_{C_1} C_{1i}^m + \beta_{C_2} C_{2i}^m + \beta_{Q_1} Q_{1i}^m + \beta_{T_1} T_{1i}^m + \beta_{T_2} T_{2i}^m + \beta_{R_1} R_{1i}^m + \beta_{F_1} F_{1i}^m + \beta_{F_2} F_{2i}^m + \varepsilon_i^m$$

La diferencia consiste en que los modelos no lineales incorporan una interpretación de los términos de error ε_i^m más compleja que para el caso lineal, y en que las valoraciones que realizan los individuos no son exactamente S_i^m .

Y en segundo lugar, en lo relativo a la relación que se establece en los modelos no lineales entre las utilidades de las alternativas de un conjunto de decisión y la probabilidad prevista por el modelo de que cada una de las alternativas sea elegida. El paradigma de comportamiento más extendido en estos modelos no lineales es asumir que los individuos muestran mayor preferencia por las alternativas con mayor utilidad, lo que se denomina en la literatura comportamiento *RUM* (*random utility maximisation*), esto es, la probabilidad de elegir la alternativa j en la situación de decisión m se toma como:

$$P_j^m = \Pr\left(S_j^m \geq \{S_1^m, \dots, S_{C_m}^m\}\right)$$

siendo C_m el total de alternativas en la situación m y S_i^m la satisfacción asociada a la alternativa i de dicho conjunto. La derivación de la expresión exacta de estas probabilidades depende del tipo de distribución conjunta de los términos de error en cada conjunto de decisión m , ($\varepsilon_1^m, \dots, \varepsilon_{C_m}^m$), tal y como se representa más adelante en la Tabla 6.2.

Una vez que se acepte que los individuos eligen aquellas alternativas que les proporcionan mayor utilidad, o cualquier otro paradigma de comportamiento, como el empleo de heurísticas menos complejas en Simon (1959) o el de estrategias de eliminación de alternativas en Tversky (1972), el modelo calcula los pesos de los atributos en su contribución a la utilidad de las alternativas, de tal forma que efectivamente se asigne una utilidad mayor a aquellas alternativas que han sido elegidas por los individuos. Este

procedimiento de *máxima verosimilitud* se traduce en la resolución del siguiente problema:

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{j \in C_m} \left(\delta_{mj} \ln P_j^m(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}, \mathbf{x}_1^m, \dots, \mathbf{x}_{C_m}^m) \right) \\ \text{s.a.} \quad & \boldsymbol{\gamma}, \boldsymbol{\beta} \text{ libre} \end{aligned}$$

donde P_j^m es la probabilidad asignada por el modelo de preferencias de que la alternativa j del conjunto de decisión m sea elegida, \mathbf{x}_j^m es el vector que contiene los valores de los atributos de dicha alternativa, $\boldsymbol{\beta}$ es el vector de coeficientes de ponderación de los atributos, $\boldsymbol{\gamma}$ es el vector de parámetros que caracterizan a las distribuciones de los términos aleatorios de las utilidades, M es el total de conjuntos de decisión disponibles en la encuesta, y δ_{mk} representa la decisión observada acerca de la alternativa k del conjunto de decisión m .

Si se considera, por ejemplo, y sin pérdida de generalidad, que las valoraciones que efectúan los individuos consisten en elegir una de las alternativas en cada conjunto de decisión, y no en ordenarlas o en asignarles un porcentaje de satisfacción, las variables δ_{mk} ($\forall k \in C_m, m = 1, \dots, M$) se toman binarias, asignándoles un valor unitario para representar que en la situación de decisión m resulta elegida la alternativa k , y un valor nulo para el resto de casos³.

La particularización de este problema general de modelos no lineales de preferencias al caso en que se emplee su versión más básica (*logit simple*) es la que sigue (véase sección 6.5.3):

$$\begin{aligned} \text{MAX} \quad & \sum_{m=1}^M \sum_{j \in C_m} \left(\delta_{mj} \left(\mu \boldsymbol{\beta} \mathbf{x}_j^m - \ln \sum_{k \in C_m} \exp(\mu \boldsymbol{\beta} \mathbf{x}_k^m) \right) \right) \\ \text{s.a.} \quad & \mu > 0, \boldsymbol{\beta} \text{ libre} \end{aligned}$$

Para garantizar que la solución en los parámetros es única, es necesario en algunos casos fijar a priori el valor de algunos de los parámetros contenidos en $(\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma})$, lo que se denomina en la literatura *normalizar* el modelo. Por ejemplo, para un logit simple es necesario fijar el valor de μ para identificar una única solución en $\boldsymbol{\beta}$. En modelos expuestos más adelante en este capítulo que generalizan al de tipo logit simple, como los modelos logit jerárquicos y mixtos, la normalización no es tan inmediata, siendo su debate central en parte de la literatura dedicada a los modelos de preferencias (Louviere *et al.*, 2000; Hensher y Greene, 2002).

³ El índice m asociado a una situación de decisión es más general que si se asocia a un individuo, pues permite considerar el caso de más de una observación por individuo.

Nótese, por último, que se ha hecho empleo en la exposición de la independencia entre observaciones, la cual se supone vigente en todos los modelos de este capítulo y en la mayoría de los considerados en la literatura. En algunos modelos se permite la inclusión de dependencias entre observaciones a través de los términos deterministas de la utilidad (Adamowicz, 1994), lo que implica que habría que considerar dependencias funcionales más amplias, como por ejemplo⁴:

$$P_j^m(\beta, \gamma, \mathbf{x}_1^1, \dots, \mathbf{x}_{C_1}^1, \dots, \mathbf{x}_1^M, \dots, \mathbf{x}_{C_M}^M)$$

En este punto, y una vez que se han introducido los modelos no lineales de preferencias y expuesto las mejoras básicas que introducen respecto al caso lineal, se procede en lo que sigue a un repaso de su evolución como herramienta eficiente en el estudio del comportamiento individual y a profundizar en los diferentes elementos que los componen.

6.5.2. Origen de los modelos no lineales de preferencias. Teoría de elección del consumidor

El desarrollo de los modelos no lineales de preferencias encuentra en la formulación del modelo logit simple en McFadden (1974) a una de sus principales contribuciones, donde se tiene por objetivo el análisis de la actividad consumidora individual, no exclusivamente de su conducta agregada a nivel de mercado, procediendo de esta forma a completar diferentes tipologías de estudio del comportamiento individual desarrollados desde principios del siglo XX.

Estos desarrollos de la teoría económica de elección del consumidor están basados en parte en los trabajos sobre psicofísica⁵ llevados a cabo en Thurstone (1927), en los que se establece, bajo el título de *ley de juicio comparativo*, que una alternativa i con un estímulo objetivo sobre el individuo de V_i , es percibido por éste con un error normal añadido, esto es, como, $V_i + \varepsilon_i$, donde $\varepsilon_i \rightarrow N(\mu, \sigma)$. Así, al enfrentar al individuo con dos estímulos diferentes se puede definir la probabilidad de que uno de ellos sea percibido como superior al otro, esto es:

⁴ La probabilidad de que se hayan producido los resultados observados en la muestra sigue siendo el producto de todas las probabilidades de las alternativas elegidas, al seguir siendo los términos aleatorios responsables del carácter probabilístico de los modelos independientes entre conjuntos de decisión, por lo que el procedimiento de máxima verosimilitud sigue vigente en la formulación expuesta anteriormente.

⁵ Disciplina que estudia las relaciones entre la magnitud de los estímulos físicos y la intensidad de las sensaciones que producen.

$$P_1 = \Pr(V_1 + \varepsilon_1 \geq V_2 + \varepsilon_2) = \Pr(\varepsilon_2 - \varepsilon_1 \leq V_1 - V_2) = \Phi(V_1 - V_2)$$

donde Φ es la función de distribución de una diferencia de variables normales independientes.

Cuando estos estímulos percibidos se analizan como niveles de satisfacción o utilidades, la ley de juicio comparativo se puede interpretar como un modelo económico de elección en el que las utilidades son aleatorias y en el que las decisiones observadas se corresponden con aquellas con el nivel de utilidad percibido, que no objetivo, más alto. Esta adaptación del trabajo de psicología clásico de Thurstone (1927) hacia decisiones de tipo económico se lleva a cabo en Marschak (1960), donde se exploran las implicaciones sobre las probabilidades de elegir las alternativas disponibles al implementarse la mencionada maximización de niveles de utilidad que contienen elementos aleatorios. Es más, en Marschak (1960) se denomina a un modelo de preferencias con estas características de *maximización de utilidades aleatorias* o de tipo *RUM*, habiéndose ya introducido anteriormente que la mayoría de modelos de preferencias no lineales en la literatura están basados en él.

Así pues, los modelos *RUM* suponen que los individuos asignan utilidades a las alternativas que le son disponibles y, al pedirle que las valoren, seleccionan la que creen que les proporciona mayor utilidad. La resolución del modelo sería de naturaleza determinista si no fuese porque las utilidades se suponen aleatorias, lo que permite, por ejemplo, la explicación del hecho esperable de que ante un mismo conjunto de decisión, una muestra de individuos no elija siempre la misma opción. Por tanto, un modelo basado en el cumplimiento de *RUM* establece que la probabilidad con que una alternativa j del conjunto de decisión m sea elegida es la siguiente, U_j^m es la utilidad de la citada alternativa y C_m es el conjunto de alternativas disponibles en dicha situación):

$$P_j^m = \Pr(U_j^m \geq U_k^m, \forall k \in C_m), \forall j \in C_m, m = 1, \dots, M$$

Este paradigma de comportamiento *RUM* se desarrolla en Marschak (1960), y también en Block y Marschak (1960), como una representación probabilística de la teoría neoclásica de la elección individual. Como característica principal incluye la independencia del sistema de probabilidades respecto a transformaciones monótonas crecientes de las utilidades.

De forma casi simultánea a la formulación *RUM* de Marschack (1960), existe otro importante trabajo de estudio del comportamiento individual en el que se introduce un axioma relacionado con las probabilidades de elec-