

1

CAPÍTULO

Introducción

1.1 ORÍGENES DE LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Desde el advenimiento de la Revolución industrial, el mundo ha sido testigo de un crecimiento importante del tamaño y la complejidad de las organizaciones. Los pequeños talleres artesanales de épocas anteriores se convirtieron en las corporaciones actuales de miles de millones de dólares. Una parte esencial de este cambio revolucionario fue el gran aumento de la división del trabajo y de la separación de las responsabilidades administrativas en estas organizaciones. Los resultados han sido espectaculares. Sin embargo, junto con los beneficios, el aumento del grado de especialización trajo consigo problemas nuevos que aún existen en numerosas organizaciones. Uno de éstos es la tendencia de algunos componentes de una organización a convertirse en imperios con autonomía relativa, con sus propias metas y sistemas de valores; de esta manera pierden de vista la forma en que sus actividades y objetivos se acoplan a los de toda la organización. Con frecuencia, lo que es mejor para un componente va en detrimento de otro, de forma que sus acciones pueden caminar hacia objetivos opuestos. Un problema relacionado es que, en la medida que aumentan la complejidad y la especialización, es más difícil asignar los recursos disponibles a las diferentes actividades de la manera más eficaz para la organización como un todo. Este tipo de problemas y la necesidad de encontrar la mejor forma de resolverlos crearon el ambiente propicio para el surgimiento de la **investigación de operaciones**, a la que también se hace referencia como **IO**.

Las raíces de la IO pueden encontrarse muchas décadas atrás,¹ cuando se hicieron los primeros intentos por emplear el método científico para administrar una empresa. Sin embargo, el inicio de la actividad llamada *investigación de operaciones* es atribuible a ciertos servicios militares que se prestaron al inicio de la Segunda Guerra Mundial. Debido a los esfuerzos bélicos, existía la urgente necesidad de asignar recursos escasos a las distintas maniobras militares y a las actividades que componían cada operación de la manera más eficaz. Por ello, las administraciones militares estadounidense y británica llamaron a un gran número de científicos para que aplicaran el método científico a éste y a otros problemas estratégicos y tácticos. En realidad, les solicitaron que hicieran *investigación sobre operaciones* (militares). Estos grupos de científicos fueron los primeros equipos de IO. Debido al desarrollo de métodos eficaces para utilizar la nueva herramienta que representaba el radar, los científicos contribuyeron al triunfo en la guerra aérea que libró Gran Bretaña. Sus investigaciones para mejorar el manejo de las operaciones antisubmarinas y de protección también tuvieron un papel importante en la victoria de la campaña del Atlántico Norte. Esfuerzos similares fueron de gran ayuda en la campaña del Pacífico.

Al terminar la guerra, el éxito de la IO en las actividades bélicas generó gran interés debido a las posibilidades de aplicarla en un ámbito distinto al militar. Una vez que la explosión industrial

¹ La referencia seleccionada 2 proporciona una entretenida historia de la investigación de operaciones que rastrea sus raíces hasta 1564 y describe una cantidad considerable de contribuciones científicas desde ese año hasta 1935 que influyeron en el desarrollo subsiguiente de la IO.

posterior a la guerra siguió su curso, los problemas provocados por el aumento de la complejidad y la especialización de las organizaciones pasaron de nuevo al primer plano. Entonces comenzó a ser evidente para un gran número de personas, entre ellas los consultores industriales que habían trabajado con o para los equipos de IO durante la guerra, que estos problemas eran en esencia los mismos que los que debían enfrentar los militares pero en un contexto diferente. Al inicio de la década de los años cincuenta, estos visionarios introdujeron el uso de la investigación de operaciones en una serie de organizaciones industriales, de negocios y del gobierno. Desde entonces, se ha desarrollado con rapidez.

Es posible identificar por lo menos otros dos factores que tuvieron gran importancia en el desarrollo de la IO durante este periodo. Uno es el progreso sustancial que se logró en el mejoramiento de las técnicas disponibles. Después de la guerra, muchos de los científicos que habían participado en equipos de IO o que tenían información sobre este trabajo, estaban motivados para realizar investigación relevante en el campo, de lo cual resultaron avances importantes; un ejemplo sobresaliente es el *método simplex* para resolver problemas de programación lineal, desarrollado en 1947 por George Dantzig. Muchas de las herramientas características de la IO, como programación lineal, programación dinámica, teoría de colas y teoría de inventarios habían sido desarrolladas casi por completo antes del término de la década de los años cincuenta.

Un segundo factor que dio gran impulso al desarrollo de este campo fue la *revolución de las computadoras*. El manejo eficaz de los complejos problemas inherentes a la IO casi siempre requiere un gran número de cálculos. Realizarlos de forma manual puede resultar casi imposible, por lo cual el desarrollo de la computadora electrónica digital, con su capacidad para hacer cálculos aritméticos, miles o tal vez millones de veces más rápido que los seres humanos, fue una gran ayuda para esta disciplina. Otro avance tuvo lugar en la década de los años ochenta, con el desarrollo de computadoras personales cada vez más rápidas y de buenos paquetes de software para resolver problemas de IO. De esta forma, las técnicas más complejas estuvieron al alcance de un gran número de personas, y este progreso se aceleró aún más en la década de 1990 y al inicio del siglo XXI. Hoy en día, millones de individuos tienen acceso a estos paquetes y en forma cotidiana se utiliza toda una gama de computadoras, desde las grandes hasta las portátiles, para resolver problemas de investigación de operaciones, algunos de ellos muy complejos.

■ 1.2 NATURALEZA DE LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

Como su nombre lo indica, el objetivo de esta disciplina implica “investigar sobre las operaciones”. En consecuencia, esta disciplina se aplica a la problemática relacionada con la conducción y la coordinación de *actividades* en una organización. En esencia, la naturaleza de la organización es irrelevante, por lo cual la IO ha sido aplicada de manera extensa en áreas tan diversas como manufactura, transporte, construcción, telecomunicaciones, planeación financiera, cuidado de la salud, fuerzas armadas y servicios públicos, por nombrar sólo unas cuantas. Así, la gama de aplicaciones es inusualmente amplia.

La IO incluye el término *investigación* en el nombre porque utiliza un enfoque similar al que se aplica en las áreas científicas establecidas. El *método científico* se utiliza para explorar los diversos problemas que deben ser enfrentados, pero en ocasiones se usa el término *management science* o *ciencia de la administración* como sinónimo de investigación de operaciones. El proceso comienza por la observación cuidadosa y la formulación del problema, lo cual incluye la recolección de los datos pertinentes. El siguiente paso es la construcción de un modelo científico —generalmente matemático— con el cual se intenta abstraer la esencia del problema real. En esta etapa se propone la hipótesis de que el modelo será una representación tan precisa de las características esenciales de la situación, que permitirá que las conclusiones —soluciones— que se obtengan sean válidas también para el problema real. Después se llevan a cabo los experimentos adecuados para probar esta hipótesis, para modificarla si es necesario y para verificarla en determinado momento, paso que se conoce como *validación del modelo*. En cierto sentido, la IO involucra la investigación científica creativa de las propiedades fundamentales de las operaciones. Sin embargo, es más que esto. La IO se ocupa también de la administración práctica de la organización. Por lo tanto, para tener éxito, también debe proporcionar conclusiones claras que el tomador de decisiones pueda usar cuando sea necesario.

Otra característica de la investigación de operaciones es su amplio punto de vista. Como quedó implícito en la sección anterior, la IO adopta una visión organizacional. Desde esta perspectiva

intenta resolver los conflictos de intereses entre los componentes de la organización de forma que el resultado sea el mejor para ésta en su conjunto. Ello no significa que el estudio de cada problema deba considerar en forma explícita todos los aspectos de la organización, sino que los objetivos que se persiguen deben ser congruentes con los objetivos globales.

Una característica adicional de la investigación de operaciones es que intenta encontrar una *mejor* solución —llamada solución *óptima*— para el problema en cuestión. (Se dice *una* mejor solución y no *la* mejor solución porque es posible que existan muchas soluciones que puedan considerarse como las mejores.) En lugar de conformarse con mejorar el estado de las cosas, la meta es identificar el mejor curso de acción posible. Aun cuando debe interpretarse con todo cuidado en términos de las necesidades reales de la administración, esta “búsqueda del mejor camino” es un aspecto importante de la IO.

Estas características conducen de manera casi natural a otra. Es evidente que no puede esperarse que un solo individuo sea experto en los múltiples aspectos del trabajo de investigación de operaciones o de los problemas que se estudian, sino que se requiere un grupo de individuos con diversos antecedentes y aptitudes. Cuando se decide emprender un estudio de IO completo de un problema nuevo, es necesario emplear el *enfoque de equipo*. Este grupo de expertos debe incluir individuos con antecedentes sólidos en matemáticas, estadística y teoría de probabilidades, al igual que en economía, administración de empresas, ciencias de la computación, ingeniería, ciencias físicas, ciencias del comportamiento y, por supuesto, en las técnicas especiales de IO. El equipo también necesita experiencia y aptitudes necesarias para considerar de manera adecuada todas las ramificaciones del problema dentro de la organización.

■ 1.3 EFECTO DE LA INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES

La investigación de operaciones ha tenido un efecto impresionante en el mejoramiento de la eficiencia de numerosas organizaciones de todo el mundo. En el proceso, la IO ha contribuido de manera significativa al incremento de la productividad de la economía de varios países. Hoy existen más de 30 países miembros de la International Federation of Operational Research Societies (IFORS), cada uno de los cuales cuenta con una sociedad de investigación de operaciones. Tanto en Europa como en Asia existen federaciones de sociedades de IO que dan conferencias y publican revistas internacionales en esos continentes. Además, el Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) es una sociedad de IO internacional. Entre sus múltiples revistas existe una, llamada *Interfaces*, que publica artículos que presentan estudios importantes de IO y el efecto que éstos tuvieron en sus organizaciones.

Para dar una mejor idea de la amplia aplicabilidad de la IO, en la tabla 1.1 se enumeran algunas aplicaciones reales. Observe la diversidad de organizaciones y aplicaciones incluidas en las primeras dos columnas. En la tercera columna se identifica la sección donde un “recuadro de aplicación” contiene varios párrafos en los que se describe la aplicación y también hace referencia a un artículo que proporciona detalles completos. (En esta sección se puede ver el primero de estos recuadros de aplicación.) La última columna indica que estas aplicaciones significaron ahorros anuales de muchos millones de dólares. Aún más, algunos beneficios adicionales no registrados en la tabla como un mejor servicio al cliente y mayor control administrativo fueron considerados más importantes, en ciertos casos, que los beneficios financieros. (El lector tendrá oportunidad de investigar estos beneficios menos tangibles en los problemas 1.3-1, 1.3-2 y 1.3-3.) En nuestro sitio web —www.mhhe.com/hillier— se incluye un vínculo con los artículos que describen estas aplicaciones a detalle.

Aunque la mayoría de los estudios rutinarios de IO proporciona beneficios mucho más modestos que estas aplicaciones reconocidas, las cifras que aparecen en la columna de la derecha de la tabla 1.1 reflejan el gran efecto que pueden tener los estudios grandes y bien diseñados de esta disciplina.

■ 1.4 ALGORITMOS Y PAQUETES DE IO

Una parte primordial de este libro es la presentación de los **algoritmos** —procedimientos sistemáticos de solución— más importantes de la IO para resolver cierto tipo de problemas. Algunos de estos

■ **TABLA 1.1** Aplicaciones de la investigación de operaciones que se describirán en los recuadros de aplicación

Organización	Área de aplicación	Sección	Ahorros anuales
Federal Express	Planeación logística de envíos	1.3	No estimados
Continental Airlines	Reasignación de tripulaciones a vuelos cuando ocurren interrupciones en el itinerario	2.2	\$40 millones
Swift & Company	Mejora del desempeño en ventas y manufactura	3.1	\$12 millones
Memorial Sloan-Kettering Cancer Center	Diseño de terapia de radiación	3.4	\$459 millones
United Airlines	Plan para los programas de trabajo de los empleados en aeropuertos y oficinas de reservación	3.4	\$6 millones
Welch's	Optimización del uso y movimiento de materias primas	3.6	\$150 000
Samsung Electronics	Reducción de tiempos de manufactura y niveles de inventario	4.3	Ganancias adicionales de \$200 millones
Pacific Lumber Company	Gestión de ecosistemas forestales a largo plazo	6.7	\$398 millones VPN
Procter & Gamble	Rediseño del sistema de producción y distribución	8.1	\$200 millones
Canadian Pacific Railway	Plan de rutas para un tren de carga	9.3	\$100 millones
United Airlines	Reasignación de aviones a vuelos cuando ocurren interrupciones	9.6	No estimados
Ejército de Estados Unidos	Planeación logística de la Operación Tormenta del Desierto	10.3	No estimados
Air New Zealand	Programación de tripulaciones en una aerolínea	11.2	\$6.7 millones
Taco Bell	Planeación de los programas de trabajo de los empleados de restaurantes	11.5	\$13 millones
Gestión de desperdicios	Desarrollo de un sistema de administración de rutas para la recolección y disposición de basura	11.7	\$100 millones
Bank Hapoalim Group	Desarrollo de un sistema de apoyo a las decisiones de asesores en inversiones	12.1	Ganancias adicionales de \$31 millones
Sears	Rutas y programación de vehículos para servicio y entregas a domicilio	13.2	\$42 millones
Conoco-Phillips	Evaluación de proyectos de exploración petrolera	15.2	No estimados
Oficina de compensaciones a los trabajadores	Gestión de solicitudes de incapacidad y rehabilitación de alto riesgo	15.3	\$4 millones
Westinghouse	Evaluación de proyectos de investigación y desarrollo	15.4	No estimados
Merrill Lynch	Administración del riesgo de liquidez de líneas de crédito revolventes	16.2	Liquidez adicional de \$4 mil millones
PSA Peugeot Citroën	Guía para el proceso de diseño de plantas de ensamble de automóviles eficientes	16.8	Utilidades adicionales de \$130 millones
KeyCorp	Mejora de la eficiencia de los cajeros de banco	17.6	\$20 millones
General Motors	Mejora de la eficiencia de líneas de producción	17.9	\$90 millones
Deere & Company	Administración de inventarios a lo largo de una cadena de suministro	18.5	Reducción de \$1 000 millones en inventario
Time Inc.	Administración de canales de distribución de revistas	18.7	Utilidades adicionales de \$3.5 millones
Bank One Corporation	Administración de líneas de crédito y tasas de interés de tarjetas de crédito	19.2	Utilidades adicionales de \$75 millones
Merrill Lynch	Análisis de precios de provisión de servicios financieros	20.2	Ganancias adicionales de \$50 millones
AT&T	Diseño y operación de centros de atención telefónica	20.5	Utilidades adicionales de \$750 millones

algoritmos son muy eficientes y casi siempre se utilizan para solucionar problemas que incluyen cientos o miles de variables. Además, se presenta una introducción acerca de cómo funcionan y qué los hace tan eficientes. Más adelante, estos algoritmos se utilizarán para resolver diversos problemas en una computadora. El **OR Courseware** que contiene el sitio web del libro (www.mhhe.com/hillier) es la herramienta clave para hacerlo.

Una característica especial del OR Courseware es el programa llamado **OR Tutor**, cuyo objetivo es ser una guía personal para ayudar en el aprendizaje de los algoritmos. Este programa contiene muchos *ejemplos de demostración* en los que se despliegan y explican los algoritmos en acción. Estas demostraciones complementan los ejemplos del libro.

Recuadro de aplicación

Federal Express (FedEx) es la compañía de transporte de paquetes más grande del mundo. Cada día de trabajo entrega más de 6.5 millones de documentos, paquetes y otros artículos a través de Estados Unidos y más de 220 países y territorios alrededor del mundo. En algunos casos, la entrega de estos embarques está garantizada para el día siguiente a las 10:30 a.m.

Los desafíos logísticos que implica proporcionar este servicio son extraordinarios. Los millones de embarques diarios deben ordenarse y ponerse en ruta de manera individual hacia la ubicación general correcta (por lo general por avión) para después ser entregados en el destino exacto (normalmente con un vehículo motorizado) en un tiempo sorprendentemente breve. ¿Cómo es esto posible?

La investigación de operaciones (IO) es el motor tecnológico que impulsa a esta compañía. Desde su fundación en 1973, la IO le ha ayudado a tomar sus decisiones de negocios más importantes, entre ellas inversiones en equipo, estructura de rutas, programación, finanzas y ubicación de instalaciones. Después de que la IO recibió el crédito por salvar a la compa-

ñía durante sus primeros años, se volvió una costumbre tener una representación de IO en las reuniones de la alta dirección y, en realidad, algunos de los vicepresidentes corporativos han surgido del destacable grupo de IO de FedEx.

FedEx ha sido reconocida como una compañía de clase mundial. De manera rutinaria se encuentra entre las mejores compañías de la lista anual de *Fortune Magazine* de “Las Compañías más Admiradas del Mundo”. También fue la primera ganadora del prestigioso premio que ahora se conoce como INFORMS, el cual se otorga todos los años por la eficaz y repetida integración de la IO en la toma de decisiones de la organización en formas originales, variadas, novedosas y duraderas.

Fuente: R. O. Mason, J. L. McKenney, W. Carlson y D. Copeland, “Absolutely, Positively Operations Research: The Federal Express Story”, *Interfaces*, 27(2): 17-36, marzo-abril de 1997. (En nuestro sitio web www.mhhe.com/hillier se proporciona un vínculo con este artículo.)

Además, el OR Courseware incluye un paquete especial llamado **Interactive Operations Research Tutorial**, o **IOR Tutorial**. Este paquete innovador fue implementado en Java y está diseñado para mejorar la experiencia de aprendizaje de los estudiantes que utilicen este libro. El IOR Tutorial incluye muchas *rutinas interactivas* para ejecutar los algoritmos de manera dinámica y en un formato conveniente. La computadora realiza todos los cálculos de rutina mientras el estudiante centra su atención en aprender y ejecutar la lógica del algoritmo. Estas rutinas interactivas son una manera eficiente e ilustrativa de resolver muchos de los problemas de tarea. El IOR Tutorial también incluye otras herramientas útiles, como algunos *procedimientos automáticos* para ejecutar algoritmos y varios otros que ofrecen un despliegue gráfico de la forma en que la solución que proporciona un algoritmo varía a medida que cambian los datos del problema.

En la práctica, los algoritmos son ejecutados en paquetes de software comercial; por ello, es importante familiarizar al estudiante con la naturaleza de los programas que utilizará en la vida profesional. El OR Courseware incluye una gran cantidad de material para introducir los tres paquetes de mayor uso, descritos a continuación. Juntos, estos paquetes permiten resolver con gran eficiencia casi todos los modelos de IO que se presentan en este libro. Además, se agregan ciertas *rutinas automáticas* propias del OR Courseware sólo para algunos casos en los que estos paquetes no son aplicables.

En la actualidad, es común el uso del paquete de hojas de cálculo líder, *Microsoft Excel*, para elaborar pequeños modelos de IO en este formato. Después, se utiliza el **Excel Solver** para resolver los modelos, en ocasiones, en una versión mejorada, como el **Premium Solver for Education** incluido en el OR Courseware. Éste incluye archivos individuales de Excel, basados en el relativamente nuevo Excel 2007, para casi cada capítulo del libro. Cada vez que se presenta un ejemplo que pueda ser resuelto con Excel, se proporciona la formulación completa en una hoja de cálculo y se da la solución en el archivo de Excel del capítulo. En el caso de muchos modelos que aparecen en el libro se dispone de una *plantilla de Excel* que incluye las ecuaciones necesarias para resolver el modelo. Algunos *complementos de Excel* también se encuentran en el sitio web de este libro.

Después de muchos años, **LINDO** —y su lenguaje de modelado **LINGO**— aún es uno de los programas de software más populares para resolver modelos de investigación de operaciones. En la actualidad es posible bajar gratis de internet las versiones para estudiante, pero también fue incluido en el OR Courseware. En cuanto a Excel, cada vez que un ejemplo pueda ser resuelto con este paquete, se darán todos los detalles en un archivo de LINGO/LINDO para ese capítulo en el OR Courseware.

CPLEX es un software muy usado para resolver problemas grandes que son un reto en investigación de operaciones. Cuando se los debe enfrentar, también es común usar un *sistema de modelado* para elaborar el modelo matemático de manera eficiente e introducirlo en la computadora. **MPL** es

un sistema de modelado amigable que utiliza principalmente CPLEX para resolver los modelos. También utiliza otros paquetes que incluyen LINDO, CoinMP (que se explica en la sección 4.8), CONOPT (que se presenta en la sección 12.9), LGO (que se introduce en la sección 12.10) y BendX (útil para resolver algunos modelos estocásticos). Una versión para el estudiante de MPL, junto con las versiones para el estudiante más recientes de CPLEX y sus restantes paquetes de solución pueden obtenerse de manera gratuita en internet. Para conveniencia del lector, en el OR Courseware también se puede encontrar esta versión para el estudiante (que incluye todos los paquetes de solución mencionados). De nuevo, todos los ejemplos que puedan resolverse con estos paquetes se detallan en los archivos MPL/CPLEX de los capítulos correspondientes en el OR Courseware.

Estos tres paquetes y la manera de usarlos son descritos con más detalle en especial cerca del final de los capítulos 3 y 4. El apéndice 1 también proporciona documentación del OR Courseware y se incluye el OR Tutor y el IOR Tutorial.

Como una indicación acerca del material relevante que se incluye en el OR Courseware, al final de cada capítulo —a partir del tercero— aparecerá una lista de ayuda para el aprendizaje de este capítulo en nuestro sitio web. Como se explica al principio de la sección de problemas de cada capítulo, fueron colocados algunos símbolos a la izquierda del número del problema o del inciso cuando este material sea útil, y se incluyeron los ejemplos de demostración y las rutinas interactivas.

Otra ayuda para el aprendizaje en nuestro sitio web es un conjunto de ejemplos desarrollados (**Worked Examples**) para cada capítulo (del 3 en adelante). Estos ejemplos resueltos sirven de complemento a los del libro para que se utilicen cuando sea conveniente, sin interrumpir el flujo de material en las múltiples ocasiones en las que no es necesario un ejemplo adicional. Estos ejemplos complementarios también pueden ser útiles durante la preparación de un examen. Siempre que un ejemplo complementario de un tema en particular esté incluido en la sección de Worked Examples del sitio web, se lo mencionará en el texto del libro. Para asegurar que esta mención no sea pasada por alto, cada vez se marcarán las palabras **ejemplo adicional** (o algo similar) en negritas.

El sitio web también incluye un glosario de cada capítulo.

■ REFERENCIAS SELECCIONADAS

1. Bell, P. C., C. K. Anderson y S. P. Kaiser, “Strategic Operations Research and the Edelman Prize Finalist Applications 1989-1998”, en *Operations Research*, **51**(1): 17-31, enero-febrero de 2003.
2. Gass, S. I. y A. A. Assad: *An Annotated Timeline of Operations Research: An Informal History*, Kluwer Academic Publishers (ahora Springer), Boston, 2005.
3. Gass, S. I. y C. M. Harris (eds.), *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, 2a. ed., Kluwer Academic Publishers, Boston, 2001.
4. Horner, P.: “History in the Making”, en *OR/MS Today*, **29**(5): 30-39, octubre de 2002.
5. Horner, P. (ed.), “Special Issue: Executive’s Guide to Operations Research”, en *OR/MS Today*, Institute for Operations Research and the Management Sciences, **27**(3), junio de 2000.
6. Kirby, M. W.: “Operations Research Trajectories: The Anglo-American Experience from the 1940s to the 1990s”, en *Operations Research*, **48**(5): 661-670, septiembre-octubre de 2000.
7. Miser, H. J., “The Easy Chair: What OR/MS Workers Should know About the Early Formative Years of Their Profession”, en *Interfaces*, **30**(2): 99-111, marzo-abril de 2000.
8. Wein, L.M. (ed.), “50th Anniversary Issue”, en *Operations Research* (un estudio especial que describe explicaciones personales de algunos desarrollos teóricos y prácticos clave recientes), **50**(1), enero-febrero de 2002.

■ PROBLEMAS

1.3-1. Seleccione una de las aplicaciones de investigación de operaciones que se mencionan en la tabla 1.1. Lea el artículo al que se hace referencia en el Recuadro de aplicación que se presenta en la sección que se muestra en la tercera columna. (En nuestro sitio web www.mhhe.com/hillier se proporciona un vínculo a todos estos artículos.) Escriba un resumen de dos páginas acerca de la aplicación y los beneficios que proporcionó; incluya los beneficios no financieros.

1.3-2. Seleccione tres de las aplicaciones de investigación de operaciones que se mencionan en la tabla 1.1. Para cada una, lea el artículo

al que se hace referencia en el Recuadro de aplicación que se presenta en la sección que se muestra en la tercera columna. (En nuestro sitio web www.mhhe.com/hillier se proporciona un vínculo a todos estos artículos.) En cada caso, escriba un resumen de una página acerca de la aplicación y sus beneficios; incluya los no financieros.

1.3-3. Lea el artículo de referencia que describe todo el estudio de IO que se resume en el Recuadro de aplicación de la sección 1.3. Enliste los diferentes beneficios financieros y no financieros que resultaron de este estudio.

Panorama del enfoque de modelado en investigación de operaciones

La mayor parte de este libro está dedicada a los métodos matemáticos de investigación de operaciones (IO). Esta situación resulta apropiada puesto que las técnicas cuantitativas constituyen la parte principal de lo que se conoce sobre el tema. Sin embargo, ello no significa que los estudios prácticos de IO sean, en esencia, ejercicios de matemáticas. Con frecuencia, el análisis matemático sólo representa una pequeña parte del trabajo. El propósito de este capítulo es dar a las cosas una mejor dimensión mediante la descripción de las etapas más importantes de un estudio característico de IO.

Una manera de resumir las fases usuales —traslapadas— de un estudio de investigación de operaciones es la siguiente:

1. Definición del problema de interés y recolección de datos relevantes.
2. Formulación de un modelo matemático que represente el problema.
3. Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución para el problema a partir del modelo.
4. Prueba del modelo y mejoramiento de acuerdo con las necesidades.
5. Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración.
6. Implementación.

En las siguientes secciones se analizará cada una de estas etapas.

Las referencias que se presentan al final del capítulo incluyen algunos estudios de IO, ganadores de premios, que proporcionan ejemplos excelentes de cómo ejecutar de manera correcta estas fases. A lo largo del capítulo se incorporarán algunos extractos de estos ejemplos. Si el lector decide aprender más acerca de estas aplicaciones, en el sitio web del libro www.mhhe.com/hillier se incluye un vínculo con los artículos que describen a detalle estos estudios de IO.

2.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA Y RECOLECCIÓN DE DATOS

En contraste con los ejemplos de los libros de texto, la mayor parte de los problemas prácticos que enfrenta un equipo de IO son descritos, al principio, de una manera vaga e imprecisa. Por consiguiente, la primera actividad será el estudio del sistema relevante y el desarrollo de un resumen bien definido del problema que será analizado. Esta etapa incluye la determinación de los objetivos apropiados, las restricciones sobre lo que es posible hacer, las interrelaciones del área en estudio con otras áreas de la organización, los diferentes cursos de acción posibles, los límites de tiempo para tomar una decisión, etc. Este proceso de definición del problema es crucial, pues afectará de forma significativa la relevancia de las conclusiones del estudio. ¡Es difícil obtener una respuesta “correcta” a partir de un problema enfocado de manera “equivocada”!

Lo primero que debe reconocerse es que un equipo de IO, por lo general, trabaja a *nivel de asesoría*. A los miembros del equipo no se les presenta un problema y se les dice que lo resuelvan

como puedan, sino que asesoran a la administración (casi siempre un tomador de decisiones clave). El equipo realiza un análisis técnico detallado y después presenta recomendaciones. Este informe identifica cierto número de opciones atractivas, en particular con diferentes supuestos o para un rango diferente de valores, de algún parámetro que marca una política que puede ser evaluada sólo por esa administración: por ejemplo, la decisión entre *costo* y *beneficio*. La administración evalúa el estudio y sus recomendaciones, analiza una variedad de factores intangibles y toma una decisión final con base en su mejor juicio. Es vital que el equipo de IO tenga una visión al mismo nivel que la administración, incluso para identificar el problema “correcto” desde el punto de vista gerencial y que, a su vez, la administración le brinde apoyo sobre cualquier curso que tome el estudio.

Un aspecto muy importante de la formulación del problema es la determinación de los *objetivos apropiados*. Para hacerlo es necesario, en primer lugar, identificar a las personas de la administración que en realidad tomarán las decisiones concernientes al sistema en estudio, y después escudriñar el pensamiento de estos individuos en relación con los objetivos pertinentes. (La inclusión del tomador de decisiones desde el principio es esencial para obtener su apoyo durante la realización del estudio.)

Por su naturaleza, a la IO le concierne el bienestar de *toda la organización*, no sólo de algunos componentes. Un estudio de IO trata de encontrar soluciones óptimas globales, y no soluciones subóptimas aunque sean lo mejor para uno de los componentes. Desde un punto de vista ideal, los objetivos formulados deben coincidir con los de toda la organización; sin embargo, esta coincidencia no siempre es conveniente. Muchos problemas interesan sólo a una parte de la organización, de manera que el análisis sería demasiado extenso si los objetivos fueran generales y se prestara atención especial a todos los efectos secundarios sobre el resto de la organización. En lugar de ello, los objetivos de un estudio deben ser tan específicos como sea posible, siempre y cuando consideren las metas principales del tomador de decisiones y mantengan un nivel razonable de congruencia con los objetivos de niveles más elevados.

Cuando se trata de organizaciones lucrativas, un enfoque posible para no caer en un problema de suboptimización es utilizar la *maximización de la ganancia a largo plazo*, considerando el valor del dinero en el tiempo como un objetivo único. El adjetivo *a largo plazo* indica que este objetivo proporciona la flexibilidad necesaria para considerar actividades que no se traducen *de inmediato* en ganancias, como los proyectos de investigación y desarrollo, pero que deberán hacerlo *con el tiempo* para que valgan la pena. Este enfoque tiene muchas ventajas. El objetivo es tan específico como para usarlo en forma adecuada y al mismo tiempo lo bastante amplio como para tomar en cuenta la meta básica de las organizaciones lucrativas. En realidad, algunas personas piensan que cualquier otro objetivo legítimo se puede traducir en ganancias.

Sin embargo, en la práctica, muchas organizaciones lucrativas no utilizan este enfoque. Algunos estudios de corporaciones estadounidenses han demostrado que la administración tiende a adoptar la meta de *ganancias satisfactorias* combinada con *otros objetivos*, en lugar de enfocarse en la maximización de la ganancia a largo plazo. Algunos de estos *otros* objetivos pueden ser conservar la estabilidad de las ganancias, aumentar o conservar la participación de mercado con que se cuenta, permitir la diversificación de productos, mantener precios estables, mejorar las condiciones y el ánimo de los trabajadores, mantener el control familiar sobre el negocio o incrementar el prestigio de la compañía. Si se satisfacen estos objetivos, tal vez se logre maximizar las ganancias a largo plazo, pero la relación puede ser tan oscura que quizá sea mejor no incorporarlos.

Existen otras consideraciones que incluyen responsabilidades sociales muy distintas al objetivo de las ganancias. Las cinco partes que son afectadas por una empresa de negocios que se localizan en un país determinado son: 1) los *dueños* (accionistas, etc.), que desean obtener ganancias (dividendos, valuación de acciones, etc.); 2) los *empleados*, que aspiran a un empleo seguro con un salario razonable; 3) los *clientes*, que quieren un producto confiable a un precio justo; 4) los *proveedores*, que desean integridad y un precio de venta razonable para sus bienes, y 5) el *gobierno* y, por ende, la *nación*, que quiere el pago de impuestos justo y que se tome en cuenta el interés común. Las cinco partes hacen contribuciones esenciales a la empresa; ésta no debe servir a ninguna de ellas para explotar a las otras. De la misma manera, las corporaciones internacionales adquieren las obligaciones adicionales de cumplir con una práctica social responsable. En consecuencia, aunque se acepte que obtener ganancias es la responsabilidad primordial de la administración, lo cual, en última instancia, beneficia a las cinco partes, también deben reconocerse estas responsabilidades sociales más extensas.

Es común que los equipos de IO pasen mucho tiempo en la *recolección de los datos relevantes* del problema. Se necesitan muchos datos para lograr la comprensión exacta del problema y así proporcionar el insumo adecuado para el modelo matemático que se elaborará en la siguiente etapa del estudio. Con frecuencia, al inicio de éste no se dispone de muchos datos necesarios, ya sea porque nunca se guardó la información o porque lo que se guardó cayó en la obsolescencia o se almacenó en una forma incorrecta. En consecuencia, muchas veces se debe instalar un nuevo *sistema de información general* para reunir los datos sobre la marcha y en la forma adecuada. El equipo de IO debe destinar un tiempo considerable para recabar la ayuda de otros miembros clave de la organización, entre ellos especialistas en *tecnología de la información* (TI), para rastrear todos los datos vitales. Aun con este esfuerzo, muchos datos pueden ser blandos, es decir, estimaciones burdas basadas sólo en juicios personales. A menudo, el equipo de IO debe utilizar una gran cantidad de tiempo para mejorar la precisión de los datos y al final tendrá que trabajar con lo mejor que pudo obtener.

Debido a la expansión del uso de bases de datos y el crecimiento explosivo de su tamaño en los años recientes, en la actualidad los equipos de IO a menudo se encuentran con que su problema más grande con los datos es que existen demasiados. Puede haber miles de fuentes de información, por lo cual la cantidad total de datos debe medirse en gigabytes o incluso en terabytes. En este entorno, la localización de los datos relevantes y la identificación de patrones interesantes pueden convertirse en tareas abrumadoras. Una de las herramientas más modernas de los equipos de IO que aborda este problema es una técnica denominada **extracción de datos**. Los métodos para aplicarla tratan de descubrir patrones interesantes dentro de las grandes fuentes de información que puedan conducir a una toma de decisiones útiles. (La segunda referencia seleccionada al final del capítulo proporciona una base más sólida acerca de la extracción de datos.)

Ejemplo. A finales de la década de los noventa, las compañías de servicios financieros generales sufrieron el ataque de las firmas de correduría electrónica que ofrecían costos de compraventa financiera muy bajos. **Merrill Lynch** respondió con la realización de un gran estudio de IO que recomendó la revisión completa de la manera en que cobraba sus servicios, desde una opción basada en activos de servicio completo —carga de un porcentaje fijo del valor de los activos en vez de hacerlo por transferencias individuales— hasta una opción de bajo costo para los clientes que deseaban invertir en línea de manera directa. La *recolección y el procesamiento de datos* tuvieron un papel fundamental en el estudio. Para analizar el efecto del comportamiento de cada uno de los clientes en respuesta a diferentes opciones, el equipo decidió montar una base de datos de clientes con una capacidad de 200 gigabytes, la cual debía contener 5 millones de clientes, 10 millones de cuentas, 100 millones de registros de transacciones y 250 millones de registros contables. Este objetivo requirió combinar, reconciliar, filtrar y limpiar datos procedentes de muchas bases de datos. La adopción de las recomendaciones del estudio produjo un incremento de cerca de 50 000 millones de dólares en la posesión de activos de sus clientes y casi 80 millones de dólares en ganancias adicionales. (La referencia seleccionada A2 describe este estudio a detalle.)

■ 2.2 FORMULACIÓN DE UN MODELO MATEMÁTICO

Una vez que el tomador de decisiones define el problema, la siguiente etapa consiste en reformularlo de manera conveniente para su análisis. La forma convencional en que la investigación de operaciones logra este objetivo es mediante la construcción de un modelo matemático que represente la esencia del problema. Antes de analizar cómo se elaboran los modelos de este tipo se explorará su naturaleza general y, en particular, la de los modelos matemáticos.

Los modelos, o representaciones idealizadas, son una parte integral de la vida diaria. Entre los ejemplos más comunes pueden citarse modelos de avión, retratos, globos terráqueos y otros. De igual manera, los modelos tienen un papel importante en la ciencia y los negocios, como lo hacen patente los modelos del átomo y de las estructuras genéticas, las ecuaciones matemáticas que describen las leyes físicas del movimiento o las reacciones químicas, las gráficas, los organigramas y los sistemas contables en la industria. Esos modelos son invaluable, pues extraen la esencia del material de estudio, muestran sus interrelaciones y facilitan el análisis.

Los modelos matemáticos también son representaciones idealizadas, pero están expresados en términos de símbolos y expresiones matemáticas. Las leyes de la física como $F = ma$ y $E = mc^2$ son ejemplos familiares. En forma parecida, el modelo matemático de un problema industrial está conformado por el sistema de ecuaciones y expresiones matemáticas relacionadas que describen la esencia del problema. De esta forma, si deben tomarse n decisiones cuantificables relacionadas entre sí, se representan como **variables de decisión** (x_1, x_2, \dots, x_n) para las que se deben determinar los valores respectivos. En consecuencia, la medida de desempeño adecuada (por ejemplo, la ganancia) se expresa como una función matemática de estas variables de decisión (por ejemplo, $P = 3x_1 + 2x_2 + \dots + 5x_n$). Esta función se llama **función objetivo**. También se expresan en términos matemáticos todas las limitaciones que se puedan imponer sobre los valores de las variables de decisión, casi siempre en forma de ecuaciones o desigualdades (como $x_1 + 3x_2 + 2x_3 \leq 10$). Con frecuencia, tales expresiones matemáticas de las limitaciones reciben el nombre de **restricciones**. Las constantes (los coeficientes o el lado derecho de las expresiones) de las restricciones y de la función objetivo se llaman **parámetros** del modelo. El modelo matemático puede decir entonces que el problema es elegir los valores de las variables de decisión de manera que se maximice la función objetivo, sujeta a las restricciones dadas. Un modelo de este tipo, y algunas de sus variantes menores, tipifican los modelos que se analizan en investigación de operaciones.

La determinación de los valores apropiados que deben asignarse a los parámetros del modelo —un valor por parámetro— es una tarea crítica y a la vez un reto en el proceso de construcción del modelo. Al contrario de los problemas que se presentan en los libros donde se proporcionan estos números, la determinación de los valores de los parámetros en los problemas reales requiere la *recolección de los datos relevantes*. Como se vio en la sección anterior, a menudo la recolección de datos exactos es difícil. Por lo tanto, es común que el valor asignado a un parámetro sea, por necesidad, sólo una estimación. Debido a la incertidumbre sobre el valor real del parámetro es importante analizar la forma de cómo cambiaría —si lo hace— la solución derivada del problema cuando el valor asignado al parámetro cambia por otros valores posibles. Este proceso, que se conoce como **análisis de sensibilidad**, se estudiará en la siguiente sección (y en gran parte del capítulo 6).

Aun cuando se hable de “el” modelo matemático de un problema industrial, por lo general los problemas reales no pueden ser representados por un solo modelo “correcto”. En la sección 2.4 se describe la manera en que el proceso de prueba de un modelo conduce a una serie de modelos que proporcionan representaciones cada vez mejores del problema real. Incluso, es posible desarrollar dos o más tipos de modelos diferentes para analizar el mismo problema.

A lo largo de este libro se proporcionarán numerosos ejemplos de modelos matemáticos. En los capítulos siguientes se estudia cierta clase de modelo con una importancia especial, denominado **modelo de programación lineal**, en el que las funciones matemáticas que aparecen tanto en la función objetivo como en las restricciones, son funciones lineales. En el capítulo 3 se construyen modelos específicos de programación lineal que se ajustan a diversos tipos de problemas, tales como determinar 1) la mezcla de productos que maximiza la ganancia, 2) el diseño de la terapia de radiación que combata de manera eficaz un tumor y que al mismo tiempo minimice el daño al tejido sano circundante, 3) la asignación de hectáreas a distintos cultivos para maximizar el rendimiento total neto y 4) la combinación de métodos de control de contaminación que logre los estándares de calidad del aire a un costo mínimo.

Los modelos matemáticos tienen muchas ventajas sobre una descripción verbal del problema. La más obvia es que describe un problema en forma mucho más concisa. Esta característica tiende a hacer más comprensible toda la estructura del problema y ayuda a revelar las relaciones importantes causa-efecto. En segundo lugar, indica con mayor claridad qué datos adicionales son importantes para el análisis. También facilita el manejo total del problema y, al mismo tiempo, el estudio de sus interrelaciones. Por último, un modelo matemático forma un puente para el empleo de técnicas matemáticas y computadoras de alto poder para analizar el problema. Sin duda, existe una amplia disponibilidad de paquetes de software para resolver muchos tipos de modelos matemáticos, en computadoras personales y de gran poder.

Por otro lado, existen obstáculos que se deben evitar cuando se utilizan modelos matemáticos. Un modelo es, por necesidad, una idealización abstracta del problema, por lo que casi siempre se requieren aproximaciones y supuestos de simplificación si se desea que el modelo sea *maneable* (susceptible de ser resuelto). Por lo tanto, debe tenerse cuidado de que el modelo sea siempre una representación válida del problema. El criterio adecuado para juzgar la validez de un modelo es si

predice o no con suficiente exactitud los efectos relativos de los diferentes cursos de acción, para poder tomar una decisión que tenga sentido. No es necesario incluir detalles sin importancia o factores que tienen casi el mismo efecto sobre todas las opciones. Ni siquiera es necesario que la magnitud absoluta de la medida de desempeño sea casi correcta para las diferentes alternativas, siempre que sus valores relativos —es decir, las diferencias entre sus valores— sean bastante precisos. En consecuencia, todo lo que se requiere es que exista una alta *correlación* entre la predicción del modelo y lo que ocurre en la vida real. Para asegurar que este requisito se cumpla, es importante hacer un número considerable de *pruebas* del modelo y las modificaciones consecuentes, que serán el tema de la sección 2.4. Aunque en el orden del libro esta fase de pruebas se haya colocado después, gran parte del trabajo de *validación del modelo* se lleva a cabo en la etapa de construcción para que sirva de guía para elaborar el modelo matemático.

En la etapa de desarrollo del modelo se recomienda empezar con una versión muy sencilla y avanzar de manera evolutiva hacia paradigmas más elaborados que reflejen mejor la complejidad del problema real. Este proceso de *enriquecimiento del modelo* continúa sólo mientras sea manejable. La decisión básica que debe tomarse oscila entre la *precisión* y el *manejo* del modelo. (Vea en la referencia 8 una descripción detallada de este proceso.)

Un paso crucial en la formulación de un modelo de IO es la construcción de la función objetivo. Esta tarea requiere desarrollar una medida cuantitativa del desempeño asociado a cada objetivo que el tomador de decisiones identifica cuando define el problema. Si en el estudio se contempla más de un objetivo, es necesario transformar y combinar las medidas respectivas en una medida compuesta de eficacia llamada **medida global de desempeño**. Esta medida compuesta puede ser algo tangible —ganancias— y corresponder a una meta más alta de la organización, o puede ser abstracta —utilidad—. En este caso, desarrollar una función de utilidad puede ser complejo y requerir una comparación cuidadosa de los objetivos y su importancia relativa. Una vez desarrollada la medida global de desempeño, la función objetivo expresa esta medida como una función matemática de las variables de decisión. De manera alternativa, existen métodos que contemplan al mismo tiempo y en forma explícita objetivos múltiples; en el capítulo 7 se analiza uno de ellos (programación de metas).

Ejemplo. La oficina responsable de control del agua y los servicios públicos del gobierno de Holanda, el **Rijkswaterstaat**, contrató un importante estudio de IO para guiar el desarrollo de una nueva política de administración del vital líquido. La nueva política ahorró cientos de millones de dólares en gastos de inversión y redujo el daño agrícola en alrededor de 15 millones de dólares anuales, al mismo tiempo que disminuyó la contaminación térmica y la debida a las algas. En lugar de elaborar sólo *un* modelo matemático se desarrolló un sistema integrado y comprensivo de ¡50 modelos! Más aún, en el caso de algunos modelos se desarrollaron versiones sencillas y complejas. La versión sencilla se usó para adquirir una visión básica que incluyó el análisis de intercambios. La versión compleja se utilizó después, en las corridas finales del análisis o cuando se deseaba mayor exactitud o más detalle en los resultados. El estudio completo de IO involucró de manera directa a más de 125 personas-año de esfuerzo, más de un tercio de ellas en la recolección de datos, creó varias docenas de programas de computadora y estructuró una enorme cantidad de datos. (La referencia seleccionada A7 describe el estudio a detalle.)

2.3 OBTENCIÓN DE SOLUCIONES A PARTIR DEL MODELO

Una vez formulado el modelo matemático del problema en estudio, la siguiente etapa de un trabajo de IO consiste en desarrollar un procedimiento, por lo general en computadora, para obtener una solución a partir de este modelo. Puede pensarse que ésta debe ser la parte principal del estudio, pero, en realidad, en la mayoría de los casos no lo es. De hecho, a veces ésta es una etapa bastante sencilla, en la que se aplica uno de los dos **algoritmos** —procedimientos iterativos de solución— de investigación de operaciones en una computadora mediante el uso de algunos de los paquetes de software disponibles. Para el investigador de operaciones experimentado, encontrar la solución es la parte divertida, mientras que el verdadero trabajo se encuentra en las etapas anteriores y en las subsecuentes, entre las que se incluyen el *análisis posóptimo*, tema que se explicará más adelante en esta sección.

Recuadro de aplicación

Continental Airlines es una importante compañía estadounidense que transporta pasajeros, carga y correo. Opera más de 2 000 salidas diarias a muchos más de 100 destinos nacionales y casi 100 internacionales.

Las aerolíneas como Continental enfrentan a diario interrupciones en el itinerario debido a eventos inesperados, entre los que se destacan inclemencias del clima, problemas mecánicos en los aviones e indisponibilidad de las tripulaciones. Estas interrupciones pueden ocasionar retrasos y cancelaciones en los vuelos. En consecuencia, las tripulaciones pueden no estar en posición de prestar el servicio en sus vuelos programados restantes. Las líneas aéreas deben reasignar tripulaciones con rapidez para cubrir los vuelos abiertos y para regresarlos a sus programas originales de una manera eficiente en cuanto a costos al mismo tiempo que cumple todas las regulaciones gubernamentales, obligaciones contractuales y elevados estándares de calidad de vida.

Para enfrentar estos problemas, un equipo de IO en Continental Airlines desarrolló un *modelo matemático* detallado para reasignar tripulaciones a vuelos tan pronto como surgen las emergencias. Como la aerolínea tiene miles de tripulaciones y vuelos diarios, el modelo necesitaba ser enorme para poder considerar todas las posibles asignaciones de tripulaciones a vuelos. Por lo tanto, el modelo tiene *millones de variables*

de decisión y muchos miles de restricciones. En su primer año de uso (principalmente en 2001), el modelo se aplicó cuatro veces para recuperarse de interrupciones de itinerario muy importantes (dos tormentas de nieve, una inundación y los ataques terroristas del 11 de septiembre). Ello produjo *ahorros de aproximadamente 40 millones de dólares*. Las aplicaciones subsiguientes se extendieron a muchas interrupciones menores diarias.

Aunque después otras aerolíneas comenzaron a aplicar investigación de operaciones de una manera similar, esta ventaja inicial sobre las demás compañías para recuperarse con más rapidez de interrupciones de itinerario con menos vuelos retrasados y cancelados colocó a Continental Airlines en una posición fuerte cuando la industria enfrentó un periodo difícil durante los años iniciales del siglo XXI. Esta iniciativa permitió a la empresa ganar en 2002 el primer lugar en la competencia internacional por el Premio Franz Edelman al desempeño en investigación de operaciones y ciencias de la administración.

Fuente: G. Yu, M. Argüello, C. Song, S. M. McGowan y A. White, "A New Era for Crew Recovery at Continental Airlines", en *Interfaces*, 33(1): 5-22, enero-febrero, 2003. (En nuestro sitio web se proporciona un vínculo con este artículo, www.mhhe.com/hillier.)

Como la mayor parte de este libro está dedicada a la obtención de soluciones para los distintos e importantes tipos de modelos matemáticos, en este momento no es necesario aclarar nada al respecto. Sin embargo, sí lo es presentar la naturaleza de ellas.

Un tema común en IO es la búsqueda de una **solución óptima**, es decir, la mejor. Sin duda, como aquí se presenta, se han desarrollado muchos procedimientos para encontrarla en cierto tipo de problemas, pero es necesario reconocer que estas soluciones son óptimas sólo respecto del modelo elaborado. Además, como éste, por necesidad, es una idealización más que una representación exacta del problema real, no existe una garantía utópica de que sea la mejor solución que pueda implantarse. Existen demasiados imponderables e incertidumbres asociados con los problemas reales; sin embargo, si el modelo está bien formulado y verificado, la solución debe tender a constituirse en una buena aproximación de un curso de acción ideal en la realidad. Por esto, más que empeñarse en exigir lo imposible, la prueba del éxito de un estudio de IO debe ser si proporciona o no una mejor guía para la toma de decisiones que la que se puede obtener por otros medios.

Herbert Simon, eminente científico de la administración y premio Nobel de economía, introdujo el concepto de que en la práctica es mucho más frecuente **satisfizar** que optimizar. Al inventar el término *satisfizar* como una combinación de *satisfacer* y *optimizar*, Simon describe la tendencia de los administradores a buscar una solución que sea "lo suficientemente buena" para el problema que se enfrenta. En lugar de intentar el desarrollo de una medida global de desempeño para conciliar de manera óptima los conflictos entre los diferentes objetivos deseables, incluso los criterios bien establecidos para juzgar el desempeño de los distintos segmentos de la organización, es posible utilizar un enfoque más pragmático. Las metas se pueden establecer de manera que marquen los niveles mínimos satisfactorios de desempeño en las diferentes áreas, con base quizá en niveles de desempeño anteriores o en los logros de la competencia. Si se encuentra una solución que permita que todas estas metas sean cumplidas, es posible que sea adoptada sin más requisitos. Ésta es la naturaleza de satisfizar.

La distinción entre optimizar y "satisfizar" refleja la diferencia entre la teoría y la realidad, disparidad que con frecuencia se encuentra al tratar de implantar esa teoría en la práctica. En pa-

labras de uno de los líderes ingleses de la investigación de operaciones, Samuel Eilon, “optimizar es la ciencia de lo absoluto; satisfacer es el arte de lo factible”.¹

Los equipos de IO intentan incorporar al proceso de toma de decisiones la mayor cantidad posible de la “ciencia de lo absoluto”. Sin embargo, un equipo que trabaja con éxito debe reconocer la necesidad más importante del tomador de decisiones: obtener una guía satisfactoria para sus acciones en un periodo razonable. Por lo tanto, la meta de un estudio de investigación de operaciones debe ser la realización del proceso de manera óptima, sin importar si implica una solución óptima para el modelo. Además de buscar la ciencia de lo absoluto, el equipo debe tomar en cuenta el costo del estudio y las desventajas de retrasar su terminación, y después, intentar maximizar los beneficios netos que resulten de dicho estudio. Al reconocer este concepto, en ocasiones los equipos de investigación de operaciones utilizan sólo **procedimientos heurísticos** —es decir, procedimientos de diseño intuitivo que no garantizan una solución óptima— para encontrar una buena **solución subóptima**. Esto ocurre con más frecuencia en los casos en que el tiempo o el costo para encontrar una solución óptima para un modelo adecuado del problema son muy grandes. En años recientes se han logrado grandes progresos en el desarrollo de procedimientos **metaheurísticos** eficientes y eficaces; estos procedimientos proporcionan una estructura general y directrices estratégicas para diseñar un procedimiento heurístico específico que se ajuste a un tipo particular de problema. El uso del enfoque metaheurístico (capítulo 13) continúa en crecimiento.

Hasta aquí ha quedado claro que un estudio de investigación de operaciones trata de encontrar una solución única, de la que puede o no requerirse que sea óptima. En realidad, esto casi nunca es lo que se busca. Una solución óptima para el modelo original puede estar muy alejada del ideal en el caso del problema real, de manera que es necesario hacer un análisis adicional. El **análisis posóptimo** —que se lleva a cabo después de encontrar una solución óptima— constituye una parte muy importante de la mayoría de los estudios de investigación de operaciones. Este análisis también se conoce como **análisis de qué pasa si**, puesto que involucra algunas preguntas acerca de *qué* pasaría con la solución óptima *si* se hubieran considerado supuestos diferentes sobre las condiciones futuras. Con frecuencia, los administradores que tomarán las últimas decisiones son quienes hacen estas preguntas y no el equipo de IO.

Con el advenimiento de los poderosos paquetes de software de hojas de cálculo, en la actualidad el papel central del análisis posóptimo suele tenerlo una de estas hojas. Una de sus grandes ventajas es la facilidad con que cualquier persona puede usarlas, incluidos los administradores, para ver qué pasa con una solución óptima cuando se introducen cambios en el modelo. Este proceso de experimentar con cambios en el modelo también puede ser útil para llegar a comprender el comportamiento del modelo y adquirir mayor confianza en su validez.

En parte, el análisis posóptimo implica llevar a cabo un **análisis de sensibilidad** para determinar qué parámetros del modelo son críticos —los “parámetros sensibles”— cuando se determina la solución. Una definición común de *parámetros sensibles* —que se usará aquí— es:

En el caso de un modelo matemático cuyos parámetros tienen valores específicos, los **parámetros sensibles** del modelo son aquellos cuyos valores no se pueden cambiar sin que la solución óptima también cambie.

La identificación de los parámetros sensibles es importante, porque determina aquellos cuyos valores deben asignarse con más cuidado para evitar distorsiones en los resultados que generará el modelo.

Por lo general, el valor de un parámetro es una *estimación* de alguna cantidad —por ejemplo, la ganancia unitaria— cuyo valor exacto se conocerá sólo después de poner en práctica la solución. Por lo tanto, después de identificar los parámetros sensibles se deben realizar estimaciones más precisas y cuidadosas de cada uno de ellos, o por lo menos del intervalo de valores posibles. Después, se busca una solución aceptable para todas las combinaciones de valores posibles de los parámetros sensibles.

Si la solución se implanta sobre la marcha, cualquier cambio posterior en el valor de un parámetro sensible señala de inmediato la necesidad de cambiar la solución.

¹ S. Eilon, “Goals and Constraints in Decision-making”, en *Operational Research Quarterly*, 23: 3-15, 1972, conferencia anual de la Canadian Operational Research Society, 1971.

En algunos casos, ciertos parámetros del modelo representan políticas de decisión, como asignación de recursos. Si es así, con frecuencia existe flexibilidad sobre los valores dados a estos parámetros. Tal vez algunos se puedan aumentar si otros disminuyen. El análisis posóptimo incluye la investigación de estas compensaciones.

Junto con la etapa de estudio que se presenta en la siguiente sección: prueba del modelo, el análisis posóptimo incluye obtener un conjunto de soluciones que comprende una serie de aproximaciones, cada vez más precisas, al curso de acción ideal. De esta forma, las debilidades aparentes de la solución inicial se usan para sugerir mejoras al modelo, a sus datos de entrada y quizás al procedimiento de solución. De esta forma se obtiene una nueva solución, y el ciclo se repite. Este proceso sigue hasta que las mejoras a soluciones sucesivas son demasiado pequeñas como para justificar su reiteración. Aun entonces pueden presentarse a la administración varias soluciones posibles —quizá soluciones que son óptimas para una de varias versiones convincentes del modelo y sus datos de entrada— para hacer la selección final. Como se explicó en la sección 2.1, esta presentación de soluciones alternativas se lleva a cabo cuando la elección final entre ellas debe basarse en consideraciones que es mejor dejar al juicio de la administración.

Ejemplo. Considere de nuevo el estudio de IO del **Rijkswaterstaat** sobre la política nacional de administración de agua en Holanda, que se presentó al final de la sección anterior. Este estudio no concluyó con la recomendación de una sola solución. Más bien, se identificaron, analizaron y compararon varias alternativas atractivas. La elección final, que se dejó al proceso político del gobierno de Holanda, culminó con la aprobación del Parlamento. El *análisis de sensibilidad* tuvo un papel importante en este estudio. Por ejemplo, ciertos parámetros de los modelos representaron estándares ecológicos. El análisis de sensibilidad incluyó la evaluación del efecto en los problemas de agua si los valores de estos parámetros fueran cambiados de los estándares ecológicos actuales a otros valores razonables. Se usó también para evaluar el efecto de cambios en los supuestos de los modelos, por ejemplo, el supuesto sobre el efecto de tratados internacionales futuros en materia de contaminación que pudiera firmar Holanda. También se analizaron varios *escenarios*, como años secos o lluviosos en extremo, para lo cual se asignaron las probabilidades adecuadas.

■ 2.4 PRUEBA DEL MODELO

En algunos aspectos, la elaboración de un modelo matemático grande es análogo al desarrollo de un programa de computadora grande. Cuando se completa la primera versión es inevitable que contenga muchas fallas. El programa debe ser probado de manera exhaustiva para tratar de encontrar y corregir tantas fallas como sea posible. Con el tiempo, después de una larga serie de programas mejorados, el programador —o equipo de programación— concluye que el programa actual proporciona, en general, resultados razonablemente válidos. Aunque sin duda quedarán algunas fallas ocultas —y quizá nunca sean detectadas— se habrá eliminado la cantidad suficiente de problemas mayores como para que su utilización sea confiable.

De manera similar, es inevitable que la primera versión de un modelo matemático complejo tenga muchas fallas. Sin duda, algunos factores o interrelaciones relevantes no fueron incorporados a él y algunos parámetros no fueron estimados con precisión. Estas circunstancias no se pueden eludir dadas las dificultades de comunicación y comprensión de todos los aspectos y sutilezas de un problema operacional complejo, así como la dificultad de recolectar datos confiables. Por lo tanto, antes de usar el modelo debe probarse de manera exhaustiva para intentar identificar y corregir la mayor cantidad posible de fallas. Con el tiempo, después de una larga serie de modelos mejorados, el equipo de investigación de operaciones concluye que el modelo actual produce resultados razonablemente válidos. Aunque sin duda quedarán algunos problemas menores ocultos en el modelo, las fallas importantes habrán sido eliminadas de manera que el uso del modelo sea confiable.

Este proceso de prueba y mejoramiento de un modelo para incrementar su validez se conoce como **validación del modelo**.

Es difícil describir cómo se lleva a cabo la validación del modelo porque el proceso depende en gran parte del problema bajo estudio y del modelo que se elaboró. Sin embargo, se harán algunos comentarios generales y después se darán algunos ejemplos (vea más detalles en la referencia 3).

Como el equipo de IO puede emplear meses en las actividades de desarrollo de todas las piezas detalladas del modelo, es fácil que “los árboles le impidan ver el bosque”. Después de completar los detalles (“los árboles”) de la versión inicial del modelo, una buena manera de comenzar las pruebas es observarlo en forma global (“el bosque”) para verificar los errores u omisiones obvias. El grupo que lleva a cabo esta revisión debe, de preferencia, incluir por lo menos a una persona que no haya participado en la elaboración del modelo. Cuando se examina de nuevo la formulación del problema y se la compara con el modelo pueden descubrirse algunos errores. También es útil asegurarse de que todas las expresiones matemáticas de las *dimensiones* de las unidades que se emplearon sean *congruentes*. Además, puede obtenerse un mejor conocimiento de la validez del modelo si se modifican los valores de los parámetros de entrada y/o de las variables de decisión, y se comprueba que los resultados del modelo se comportan de una manera plausible. A menudo estos resultados son reveladores, en especial cuando son asignados a los parámetros o variables valores extremos cercanos a sus máximos o a sus mínimos.

Un planteamiento más sistemático de la prueba del modelo se logra mediante el empleo de una **prueba retrospectiva**. Cuando es aplicable, esta prueba utiliza datos históricos y reconstruye el pasado para determinar si el modelo y la solución resultante hubieran tenido un buen desempeño, si se hubieran usado. La comparación de la eficacia de este desempeño hipotético con lo que en realidad ocurrió indica si la utilización del modelo tiende a generar mejoras significativas respecto de la práctica actual. Puede indicar también áreas en las que el modelo tiene fallas y requiere modificaciones. Aún más, cuando se emplean las alternativas de solución y se estiman sus desempeños históricos hipotéticos, se pueden reunir evidencias sobre la precisión del modelo para predecir los efectos relativos de los diferentes cursos de acción.

Por otra parte, la prueba retrospectiva tiene la desventaja de que se basa en los mismos datos que sirvieron para formular el modelo. Entonces, la pregunta crucial es si el pasado en realidad representa el futuro. Si no es así, el modelo puede tener un desempeño distinto en el futuro del que haya tenido en el pasado.

Para evitar esta desventaja de la prueba retrospectiva, a veces es útil continuar con las circunstancias actuales durante una temporada. Este recurso proporcionará nuevos datos con los cuales no se contaba cuando el modelo fue construido, los que se pueden emplear de la manera descrita para evaluar el modelo.

Es importante documentar el proceso que se utiliza para llevar a cabo las pruebas de la validación del modelo, pues ello ayuda a aumentar la confianza de los futuros usuarios del paradigma. Más aún, si en el futuro surgen preocupaciones sobre el modelo, esta documentación ayudará a diagnosticar en dónde pueden encontrarse los problemas.

Ejemplo. Considere un estudio de IO realizado para **IBM** cuyo objetivo era integrar su red nacional de inventarios de refacciones para mejorar el servicio a los clientes, al mismo tiempo que reducir el valor de aquéllos en más de 250 millones de dólares y ahorrar otros 20 millones de dólares anuales mediante el mejoramiento de la eficiencia operacional. Un aspecto en particular interesante de la etapa de validación del modelo en este estudio fue la manera en que fueron incorporados al proceso de prueba los *usuarios futuros* del sistema de inventarios. Debido a que estos usuarios futuros —los administradores de IBM de las áreas funcionales responsables de la implantación del sistema de inventarios— dudaban del sistema que se desarrollaba, fueron asignados representantes de la empresa a un *equipo de usuarios* que tendría la función de asesorar al equipo de IO. Una vez desarrollada la versión preliminar del nuevo sistema—basada en un sistema de inventarios de multiniveles— se llevó a cabo una *prueba preliminar de implementación*. La extensa retroalimentación por parte del equipo de usuarios generó mejoras importantes en el sistema propuesto. (La referencia seleccionada A5 describe este estudio a detalle.)

■ 2.5 PREPARACIÓN PARA APLICAR EL MODELO

¿Qué pasa después de completar la etapa de pruebas y desarrollar un modelo aceptable? Si el modelo va a usarse varias veces, el siguiente paso es instalar un *sistema* bien documentado para aplicarlo según lo establecido por la administración. Este sistema debe incorporar el modelo y el procedimiento de solución —que incluye el análisis posóptimo— y los procedimientos operativos

para su implantación. Así, aun cuando cambie el personal, el sistema puede ser consultado de manera periódica para proporcionar una solución numérica específica.

Este sistema casi siempre *se diseña para computadora*. En realidad, con frecuencia se necesita un número considerable de programas integrados. Las *bases de datos* y los *sistemas de información administrativos* pueden proporcionar la entrada actualizada para el modelo cada vez que se use, en cuyo caso se necesitan programas de interfaz, es decir, interacción con el usuario. Después de aplicar un procedimiento de solución —otro programa— al modelo, puede ser que los programas adicionales manejen la implementación de los resultados de manera automática. En otros casos, se instala un sistema *interactivo* de computadora llamado **sistema de apoyo para las decisiones** para ayudar a la administración a usar los datos y modelos y así apoyar (no sustituir) su toma de decisiones. Otro programa puede generar *informes gerenciales* (en lenguaje administrativo) que interpreten la salida del modelo y sus implicaciones prácticas.

En estudios de IO importantes se pueden emplear varios meses (o más) para desarrollar, probar e instalar este sistema de computadora. Parte de este esfuerzo incluye el desarrollo e implantación de un proceso de mantenimiento durante su uso futuro. Si con el tiempo cambian las condiciones, este proceso debe incorporar las modificaciones correspondientes al sistema de computadora y al modelo.

Ejemplo. El Recuadro de aplicación de la sección 2.2 describió un estudio de IO que se elaboró para **Continental Airlines** que condujo a la formulación de un enorme modelo matemático para reasignar tripulaciones a los vuelos cuando ocurrían interrupciones en el itinerario. Como el modelo debe aplicarse de inmediato cuando hay una interrupción, se desarrolló un *sistema de soporte a las decisiones* llamado *CrewSolver* para incorporar tanto el modelo como una gigantesca memoria de datos almacenados que representaban las operaciones actuales. El *CrewSolver* permite que un coordinador de tripulaciones ingrese datos relacionados con la interrupción en el itinerario y después utilice una interfaz gráfica con el usuario para solicitar una solución inmediata y encontrar la mejor manera de reasignar tripulaciones a los vuelos.

■ 2.6 IMPLEMENTACIÓN

Una vez desarrollado el sistema para aplicar el modelo, la última etapa de un estudio de IO es implementarlo según lo haya establecido la administración. Esta etapa es crítica, pues aquí y sólo aquí se cosecharán los beneficios del estudio. Por lo tanto, es importante que el equipo de IO participe para asegurar que las soluciones del modelo se traduzcan con exactitud en un procedimiento operativo, y para corregir defectos en la solución que se presenten en cualquier momento.

El éxito de la implementación depende en gran medida del apoyo que proporcionen tanto la alta administración como la gerencia operativa. Es más probable que el equipo de IO obtenga este apoyo si ha mantenido a la administración bien informada y ha fomentado la guía de ésta durante el estudio. La buena comunicación ayuda a asegurar que el estudio logre lo que pretende y, por lo tanto, merezca ponerse en práctica. También proporciona a la administración el sentimiento de que el estudio es suyo y facilita el apoyo para su implementación.

La etapa de implementación incluye varios pasos. Primero, el equipo de IO explica en forma cuidadosa a la administración operativa el nuevo sistema que debe adoptar y su relación con la realidad operativa. A continuación, estos dos grupos comparten la responsabilidad de desarrollar los procedimientos que se requieren para poner el sistema en operación. Después, la administración operativa se encarga de proporcionar una capacitación detallada al personal que participa, y se inicia el nuevo curso de acción. Si tiene éxito, el nuevo sistema se podrá emplear durante algunos años. Con este objetivo en mente, el equipo de IO supervisa la experiencia inicial con base en la acción que se tomó para identificar cualquier modificación que deba hacerse en el futuro.

Durante el periodo de uso del nuevo sistema, es importante continuar con la retroalimentación acerca de su funcionamiento y si los supuestos todavía se cumplen. Cuando ocurren desviaciones significativas de los supuestos originales, el modelo debe ser revisado para determinar si necesita modificaciones. El análisis posóptimo que se realice (vea la sección 2.3) puede ser una guía útil en este proceso de revisión.

Durante la fase de culminación del estudio es apropiado que el equipo de investigación de operaciones *documente* su metodología con suficiente claridad y detalle para que el trabajo pueda *reproducirse*. La posibilidad de obtener una *réplica* debe ser parte del código ético profesional del investigador de operaciones. Esta condición es en especial importante cuando se estudian políticas gubernamentales controvertidas.

Ejemplo. Este ejemplo ilustra cómo, en ocasiones, una fase de implementación exitosa requiere el involucramiento de miles de empleados antes de poner en marcha los nuevos procedimientos. **Samsung Electronics Corp.** inició un importante estudio de IO en marzo de 1996 para desarrollar nuevas metodologías y programar el calendario de aplicaciones que pudieran incrementar el nivel de eficiencia de todo el proceso de manufactura de semiconductores y reducir el nivel de inventarios de productos en proceso. El estudio continuó por más de cinco años y llegó a su fin en junio de 2001, debido, de manera principal, al gran esfuerzo que requirió la etapa de implementación. El equipo de IO debió obtener el apoyo de muchos integrantes de las áreas de administración, manufactura e ingeniería; dicho apoyo lo obtuvo mediante la capacitación del personal en los principios y la lógica de los nuevos procedimientos de manufactura. Al final del proceso, más de 3 000 personas habían asistido a las sesiones de capacitación. Después, los nuevos procedimientos fueron incorporados de manera gradual para construir confianza en ellos. Este paciente proceso de implementación pagó grandes dividendos. Los nuevos procedimientos hicieron que la compañía se convirtiera de la manufacturera menos eficiente de la industria de los semiconductores en la más eficiente. Este logro incrementó las ganancias en más de 1 000 millones de dólares en el momento en que se completó el estudio de IO. (La referencia seleccionada A11 describe el estudio a detalle.)

■ 2.7 CONCLUSIONES

Aunque el resto de este libro se enfoca de manera fundamental en la *construcción* y *solución* de modelos matemáticos, en este capítulo se intentó hacer hincapié en que esos elementos sólo son una porción del proceso completo necesario para llevar a cabo un estudio de IO representativo. Las otras etapas que se describieron son también muy importantes para el éxito del estudio. Se pide al lector que en los capítulos subsecuentes no pierda de vista el papel que tienen el modelo y el procedimiento de solución dentro del proceso completo. Después, cuando haya adquirido una comprensión más profunda de los modelos matemáticos, se sugiere que planee regresar y revisar este capítulo con el fin de profundizar en esta perspectiva.

La investigación de operaciones está ligada en forma íntima al empleo de computadoras. Hasta hace poco se usaban de manera casi exclusiva computadoras grandes, pero cada vez es mayor el uso de las computadoras personales y estaciones de trabajo para resolver modelos de IO.

Para concluir la presentación de las etapas más importantes de un estudio de IO, debe observarse que existen muchas excepciones a las “reglas” prescritas en este capítulo. Por su naturaleza, la investigación de operaciones requiere una gran dosis de ingenio e innovación, por lo que es imposible prescribir un procedimiento estándar que los equipos de IO deban seguir siempre. En su lugar, la descripción anterior debe verse como un modelo que representa, a grandes rasgos, cómo llevar a cabo un estudio exitoso de investigación de operaciones.

■ REFERENCIAS SELECCIONADAS

1. Board, J., C. Sutcliffe y W. T. Ziemba: “Applying Operations Research Techniques to Financial Markets”, en *Interfaces*, **33**(2): 12-24, marzo-abril, 2003.
2. Bradley P. S., U. M. Fayyad y O. L. Mangasarian, “Mathematical Programming for Data Mining: Formulations and Challenges”, en *INFORMS Journal of Computing*, **11**(3): 217-238, verano de 1999.
3. Gass, S. I., “Decision-Aiding Models: Validation, Assessment, and Related Issues for Policy Analysis”, en *Operations Research*, **31**: 603-631, 1983.
4. Gass, S. I., “Model World: Danger, Beware the User as Modeler”, en *Interfaces*, **20**(3): 60-64, mayo-junio de 1990.
5. Hall, R. W., “What’s So Scientific about MS/OR?”, en *Interfaces*, **15**(2): 40-45, marzo-abril de 1985.
6. Howard, R. A., “The Ethical OR/MS Professional”, en *Interfaces*, **31**(6): 69-82, noviembre-diciembre de 2001.

7. Miser, H. J., "The Easy Chair: Observation and Experimentation", en *Interfaces*, **19**(5): 23-30, septiembre-octubre de 1989.
8. Morris, W. T., "On the Art of Modeling", en *Management Science*, **13**: B707-717, 1967.
9. Murphy, F. H., "The Occasional Observer: Some Simple Precepts for Project Success", en *Interfaces*, **28**(5): 25-28, septiembre-octubre de 1998.
10. Murphy, F. H., "ASP, The Art and Science of Practice: Elements of the Practice of Operations Research: A Framework", en *Interfaces*, **35**(2): 154-163, marzo-abril de 2005.
11. Pidd, M., "Just Modeling Through: A Rough Guide to Modeling", en *Interfaces*, **29**(2): 118-132, marzo-abril de 1999.
12. Williams, H. P., *Model Building in Mathematical Programming*, 4a. ed., Wiley, Nueva York, 1999.
13. Wright, P. D., M. J. Liberatore y R. L. Nydick, "A Survey of Operations Research Models and Applications in Homeland Security", en *Interfaces* **36**(6): 514-529, noviembre-diciembre de 2006.

Algunas aplicaciones ganadoras de premios con el enfoque de modelado de IO

(En nuestro sitio web www.mhhe.com/hillier se proporciona un vínculo a todos estos artículos.)

- A1. Alden, J. M., L. D. Burns, T. Costy, R. D. Hutton, C. A. Jackson, D. S. Kim, K. A. Kohls, J. H. Owen, M. A. Turnquist y D. J. V. Veen, "General Motors Increase Its Production Throughput", en *Interfaces*, **36**(1): 6-25, enero-febrero de 2006.
- A2. Altschuler, S., D. Batavia, J. Bennett, R. Labe, B. Liao, R. Nigam y J. Oh, "Pricing Analysis for Merrill Lynch Integrated Choice", en *Interfaces*, **32**(1): 5-19, enero-febrero de 2002.
- A3. Bixby, A., B. Downs y M. Self, "A Scheduling and Capable-to-Promise Application for Swift & Company", en *Interfaces*, **36**(1): 69-86, enero-febrero de 2006.
- A4. Braklow, J. W., W. W. Graham, S. M. Hassler, K. E. Peck y W. B. Powell, "Interactive Optimization Improves Service and Performance for Yellow Freight System", en *Interfaces*, **22**(1): 147-172, enero-febrero de 1992.
- A5. Cohen, M., P. V. Kamesam, P. Kleindorfer, H. Lee y A. Tekerian, "Optimizer: IBM's Multi-Echelon Inventory System for Managing Service Logistics", en *Interfaces*, **20**(1): 65-82, enero-febrero de 1990.
- A6. DeWitt, C. W., L. S. Lasdon, A. D. Waren, D. A. Brenner y S. A. Meelhem, "OMEGA: An Improved Gasoline Blending System for Texaco", en *Interfaces*, **19**(1): 85-101, enero-febrero de 1990.
- A7. Goeller, B. F. y el equipo de PAWN, "Planning the Netherlands' Water Resources", en *Interfaces*, enero-febrero de 1985.
- A8. Hicks, R., R. Madrid, C. Milligan, R. Pruneau, M. Kanaley, Y. Dumas, B. Lacroix, J. Desrosiers y F. Soumis, "Bombardier Flexjet Significantly Improves Its Fractional Aircraft Ownership Operations", en *Interfaces*, **35**(1): 49-60, enero-febrero de 2005.
- A9. Kaplan, E. H. y E. O'Keefe, "Let the Needles Do the Talking! Evaluating the New Haven Needle Exchange", en *Interfaces*, **23**(1): 7-26, enero-febrero de 1993.
- A10. Kok, T. de, F. Janssen, J. van Doremalen, E. van Wachem, M. Clerckx y W. Peeters, "Philips Electronics Synchronizes Its Supply Chain to End the Bullwhip Effect", en *Interfaces*, **35**(1): 37-48, enero-febrero de 2005.
- A11. Leachman, R. C., J. Kang y V. Lin, "SLIM: Short Cycle Time and Low Inventory in Manufacturing at Samsung Electronics", en *Interfaces*, **32**(1): 61-77, enero-febrero de 2002.
- A12. Taylor, P. E. y S. J. Huxley, "A Break from Tradition for the San Francisco Police: Patrol Officer Scheduling Using an Optimization-Based Decision Support System", en *Interfaces*, **19**(1): 4-24, enero-febrero de 1989.

■ PROBLEMAS

2.1-1. El ejemplo de la sección 2-1 resume un estudio de IO ganador de premios otorgados a Merrill Lynch. Lea la referencia seleccionada A2 que describe este estudio a detalle.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Cite el enunciado de una sola oración con la misión general del grupo de IO (llamado el grupo de ciencia de la administración) que realizó este estudio.

- c) Explique el tipo de datos que el grupo de ciencia de la administración obtuvo de cada cliente.
- d) Identifique las opciones de nuevos precios que fueron proporcionadas a los clientes de la compañía como resultado de este estudio.
- e) ¿Cuál es el efecto resultante sobre la posición competitiva de Merrill Lynch?

2.1-2. Lea la referencia seleccionada A1 que describe un estudio de IO ganador de premios realizado para General Motors.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) ¿Cuál es la meta de este estudio?
- c) Describa cómo se utilizó el software para automatizar la recolección de los datos necesarios.
- d) ¿Cuánto generó en ahorros documentados y ganancias adicionales la mejora en la producción que resultó de este estudio?

2.1-3. Lea la referencia seleccionada A12 que describe un estudio de IO realizado para el Departamento de Policía de San Francisco.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Defina parte del problema a que se refieren las seis metas del sistema de programación a desarrollar.
- c) Describa cómo fueron recolectados los datos necesarios.
- d) Enumere los distintos beneficios tangibles e intangibles resultados del estudio.

2.1-4. Lea la referencia seleccionada A9 que describe un estudio de IO que se realizó para el Departamento de Salud de New Haven, Connecticut.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Describa el sistema que se desarrolló para rastrear y probar cada aguja y cada jeringa con el fin de reunir los datos necesarios.
- c) Resuma los resultados iniciales de este sistema de rastreo y pruebas.
- d) Describa el efecto real y potencial de este estudio en las políticas gubernamentales.

2.2-1. Lea el artículo al que se hace referencia en el Recuadro de aplicación de la sección 2.2, el cual describe por completo el estudio de IO que se resume en dicho recuadro. Enumere los diferentes beneficios financieros y no financieros que resultaron de este estudio.

2.2-2. Lea la referencia seleccionada A3 que describe un estudio de IO realizado para Swift & Company.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Describa el propósito de cada uno de los tres tipos generales de modelos que se formularon durante este estudio.
- c) ¿Cuántos modelos específicos utiliza en la actualidad la compañía como resultado de este estudio?
- d) Enumere los distintos beneficios financieros y no financieros que resultaron de este estudio.

2.2-3. Lea la referencia seleccionada A7 que describe un estudio de IO que se realizó para el Rijkswaterstaat de Holanda. (Preste especial atención en las páginas 3-20 y 30-32.)

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Resuma el objetivo de cada uno de los cinco modelos matemáticos que se describen en las páginas 10-18.
- c) Resuma las “medidas de efecto” (medidas de desempeño) para comparar las políticas que se describen en las páginas 6-7 de este artículo.
- d) Enumere los distintos beneficios tangibles e intangibles que resultaron de este estudio.

2.2-4. Lea la referencia seleccionada 5.

- a) Identifique el ejemplo del autor sobre un modelo de las ciencias naturales y uno de IO.
- b) Describa el punto de vista del autor sobre la manera en que los principios básicos del uso de modelos para realizar investigación

en ciencias naturales puede usarse para guiar la *investigación sobre las operaciones* (IO).

2.3-1. Lea la referencia seleccionada A10 que describe un estudio de IO realizado para Philips Electronics.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a realizar este estudio.
- b) ¿Cuál fue el propósito de este estudio?
- c) ¿Cuáles fueron los beneficios de desarrollar software para apoyar la resolución más rápida de problemas?
- d) Enumere los cuatro pasos del proceso de colaboración y planeación que resultó de este estudio.
- e) Enumere los distintos beneficios financieros y no financieros que resultaron de este estudio.

2.3-2. Lea la referencia seleccionada 5.

- a) Describa el punto de vista del autor sobre el hecho de que la única meta al usar un modelo debe ser encontrar su solución óptima.
- b) Resuma el punto de vista del autor sobre los papeles complementarios del modelado, la evaluación de la información que se obtiene y la aplicación del juicio del tomador de decisiones para determinar un curso de acción.

2.4-1. Consulte las páginas 18-20 de la referencia seleccionada A7 que describe un estudio de IO realizado para el Rijkswaterstaat de Holanda. Describa una lección importante aprendida con la validación del modelo en este estudio.

2.4-2. Lea la referencia seleccionada 7. Resuma el punto de vista del autor sobre el papel de la observación y la experimentación en el proceso de validación del modelo.

2.4-3. Lea las páginas 603-617 de la referencia seleccionada 3.

- a) ¿Qué dice el autor sobre el hecho de que un modelo se puede validar por completo?
- b) Resuma la diferencia entre *validación del modelo*, *de los datos*, *validación lógica/matemática*, *predictiva*, *operativa* y *dinámica*.
- c) Describa el papel del *análisis de sensibilidad* en la *validación operativa* de un modelo.
- d) ¿Qué dice el autor sobre la existencia de una metodología de validación adecuada para todos los modelos?
- e) Cite la página del artículo que enumera los pasos básicos de la validación.

2.5-1. Lea la referencia seleccionada A6 que describe un estudio de IO que se realizó para Texaco.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Describa brevemente la interfaz del usuario con el sistema de apoyo a las decisiones OMEGA que se desarrolló como resultado de este estudio.
- c) OMEGA se actualiza y amplía en forma constante para reflejar los cambios en el ambiente de las operaciones. Describa los distintos tipos de cambios realizados.
- d) Resuma cómo se usa el sistema OMEGA.
- e) Enumere los distintos beneficios tangibles e intangibles que resultaron de este estudio.

2.5-2. Consulte la referencia seleccionada A4 que describe un estudio de IO que se realizó para la Yellow Freight System, Inc.

- a) Con base en lo expuesto en las páginas 147-149 de este artículo, resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) De acuerdo con lo que se explicó en la página 150, describa en forma breve el sistema de computadora SYSNET que se desarro-

lló como resultado de este estudio. También dé un resumen de las aplicaciones de SYSNET.

- c) Según lo expuesto en las páginas 162-163, describa por qué eran importantes los aspectos *interactivos* de SYSNET.
- d) Con base en lo que se explicó en la página 163, resuma la salida de SYSNET.
- e) De acuerdo con lo que se expone en las páginas 168-172, resuma los distintos beneficios que ha generado el uso de SYSNET.
- c) Presente una descripción breve de las pruebas anteriores a la implementación de Optimizer.
- d) Describa en forma breve las pruebas de implementación en el campo de trabajo.
- e) Describa de manera sucinta el proceso de implementación a nivel nacional.
- f) Enumere los distintos beneficios tangibles e intangibles que resultaron de este estudio.

2.6-1. Consulte las páginas 163-167 de la referencia seleccionada A4 que describe el estudio de IO que se realizó para la Yellow Freight System, Inc. y el sistema de computadora SYSNET que se desarrolló como consecuencia de él.

- a) Describa de modo breve la forma en que el equipo de IO logró el apoyo de la alta administración para la implantación de SYSNET.
- b) Describa de forma breve la estrategia de implementación desarrollada.
- c) Describa de manera somera la implementación en el campo de trabajo.
- d) Describa de modo sucinto cómo se usaron los incentivos y la vigilancia de la administración para implementar SYSNET.

2.6-2. Lea la referencia seleccionada A5 que describe un estudio de IO que se realizó para IBM y el sistema Optimizer que resultó de él.

- a) Resuma los antecedentes que llevaron a emprender este estudio.
- b) Enumere los factores de complicación a los que se enfrentaron los integrantes del equipo de IO al inicio del desarrollo de un modelo y un algoritmo de solución.

2.7-1. De la última parte de las referencias seleccionadas que se presentan al final del capítulo, seleccione una de las aplicaciones ganadoras de premios del enfoque de modelado de IO (sin considerar las asignadas para otros problemas). Lea el artículo y escriba un resumen de dos páginas de la aplicación y los beneficios que proporcionó (incluya los beneficios no financieros).

2.7-2. De la última parte de las referencias seleccionadas que se presentan al final del capítulo, seleccione tres de las aplicaciones ganadoras de premios del enfoque de modelado de IO (sin considerar las asignadas para otros problemas). Lea cada uno de los artículos y escriba un resumen de una página de la aplicación y los beneficios que proporcionó (incluya los beneficios no financieros).

2.7-3. Lea la referencia seleccionada 4. El autor describe 13 etapas detalladas de cualquier estudio que desarrolla y aplica un modelo basado en computadora, mientras que este capítulo describe seis etapas más amplias. Establezca una relación entre los dos niveles al enumerar las etapas detalladas que caen, parcial o primordialmente, dentro de cada etapa más amplia.