
OPINIONES SOBRE LA PROFESIÓN

Some personal reflections on OR

Laureano F. Escudero

Dpto. de Estadística e Investigación-Operativa
Universidad Rey Juan Carlos
✉ laureano.escudero@urjc.es

1. El entorno de Investigación-Operativa

La Investigación-Operativa (I-O) es una disciplina dentro de la matemática aplicada que su mayor razón de ser consiste en la ayuda que sus métodos puedan prestar al empresario o al administrador público, para así tomar mejores decisiones en su entorno operativo, de lo contrario no tendría mucho interés. En efecto, la I-O consiste en estudiar científicamente la logística del transporte, de producción, de compras de materiales, la gestión de stock o las políticas de recursos humanos, y de inversiones, entre muchas otras, de tal forma que, con modelos matemáticos, se muestren las posibles alternativas que tiene un sujeto para tomar decisiones en torno a ellas, y elegir aquella que sea factible y produzca resultados satisfactorios u óptimos en una o varias funciones de mérito.

Obviamente, la I-O también debe adaptarse a cada país y a cada tipo de industria según su vocación. Por ejemplo, en USA, Canadá y Europa, el sector de los transportes funcionaría muy distinto si no contara con los métodos de I-O que tienen hoy día. Es así como las grandes compañías de aviación comercial utilizan estas herramientas para planificar y coordinar sus diversos recursos, tales como los pilotos y el personal de vuelo, el mantenimiento, la disponibilidad de aviones, las escalas a realizar, la planificación de los vuelos, entre otras actividades. Sin duda, una de las grandes aplicaciones de la I-O se concentró en los transportes.

En un entorno global en el que las decisiones hay que tomarlas con precisión, ya que van a tener una trascendencia cada vez mayor por el tamaño de nuestras compañías y el aumento de fusiones y alianzas, la I-O es pieza clave en el desarrollo cotidiano de las mismas. Frente a la situación de adquirir nueva maquinaria e invertir en nuevas sedes o penetrar en otros mercados, lo que es sin duda afectará a la marcha de la compañía a largo plazo, no se puede prever el aumento del costo de los combustibles u otras vicisitudes que, obviamente, influirán en los resultados de las decisiones tomadas por el empresario. Sin embargo, la aplicación de la I-O permite adelantarse y estimar el conjunto de escenarios que

pueden presentarse, para así elegir la mejor opción de respuesta después de un riguroso análisis. No obstante, vale la pena aclarar que la aplicación de métodos de I-O sin utilizar la intuición del empresario que los complementa avalada por su experiencia, sería una mala decisión en la mayoría de las situaciones.

2. Mi periplo científico

En este entorno comencé mi periplo científico en IBM España en 1965 y pertenezco a su Centro Científico desde su fundación en 1972. Muy pronto entré en contacto con la comunidad científica de IBM, y en 1976 tuvo la oportunidad de encontrar a Kurt Spielberg, fallecido recientemente en un trágico accidente, y poco después entré en contacto con su mujer Monique Guignard, que está en su pleno apogeo científico. Iniciamos una relación personal y científica que ha durado hasta nuestros días en optimización combinatoria y programación estocástica.

Después de dos años (1978-1980) en el Centro Científico de IBM en Palo Alto (California), muy cerca de la Universidad de Stanford, donde tuve el gran privilegio y oportunidad de encontrarme con George Dantzig y sus seminarios, decidimos volver a Madrid.

A principio de los años 80 tuve la oportunidad de colaborar con Jaume Barceló. Comenzamos una serie de seminarios sobre Programación Matemática que creo fueron muy útiles para la comunidad de I-O en España, dado el tipo de conferenciantes que nos honraron con sus conferencias y posterior colaboración, tales como George Dantzig, Martin Beale, Kurt Spielberg, Martin Grötschel, Terry Rockafellar (invitado por Angel Marín) y Freek Loostma (en Madrid), y Egon Balas, Manfred Padberg, Ellis Johnson, George Nemhauser, Bernard Korte, Philippe Toint, Julián Araoz y Silvano Martello en Barcelona, y muchos otros tales como Mike Powell y John Dixon en otras ciudades.

A mediados de los 80 fuimos a Alemania a trabajar en el periodo 1986-1987 en el Centro de Tecnologías de la Producción de IBM Alemania. Durante esta estancia tuve la gran oportunidad de encontrar a Martin Grötschel, Gerd Reinelt and Mikel Junger entonces en la Universidad de Augsburg. Me enseñaron como hacer dura investigación básica en programación matemática. Introdujimos conjuntamente el Problema del Ordenamiento Secuencial que ha dado origen a varias tesis doctorales en España y Alemania.

Durante este periodo comenzamos una exitosa cooperación científica con la Universidad del País Vasco en Bilbao, donde al cabo de los años se pudieron leer las tesis de Gloria Pérez, Araceli Garín y más tarde la de María Merino. Desde entonces disfrutamos de una sólida amistad ambientada en un gran cooperación científica.

Y, de repente, el 1 de Septiembre de 1988 me encuentro en el mítico Centro de Investigación IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights, NY.

Allí tuve la oportunidad de colaborar con ese magnífico equipo formado por Alan Hoffman, Philip Wolfe, Ellis Johnson, Bill Pulleyblank, John Forrest, David Jensen, Alan King, Francisco Barahona y otros, incluyendo a Brenda Dietrich. Allí estuve desde 1988 a 1991. Muy pronto Brenda y yo fuimos asignados a trabajar en equipo. En aquella época Brenda era un miembro staff de investigación. Estuvimos trabajando día tras día durante tres años en programación matemática básica y aplicada. Fueron años que nunca olvidaré. Después, al cabo de los años, Brenda sería IBM Fellow e IBM Vicepresident.

En Septiembre de 1991 decidimos volver a casa, y comencé a trabajar como profesor asociado en el Dpto. de Estadística e I-O de la Universidad Complutense (al mismo tiempo que tuve varios cargos en el Grupo Iberdrola, entre otros la dirección del Dpto. de Ingeniería de Sistemas de Apoyo a la Decisión en Iberdrola Ingeniería y Consultoría). Allí tuve la oportunidad de corresponder con Francisco Cano, Miguel Sánchez, Miguel Angel Gómez Villegas, Javier Montero, Juan Tejada, Javier Yañez, Angel Felipe y otros, y supervisar las tesis doctorales de Teresa Ortuño, Antonio Alonso Ayuso, Pilar Cristóbal y Susana Muñoz. Fueron 8 años extraordinarios, con una intensa actividad científica en optimización entera y programación estocástica, conjuntamente con Teresa, Antonio, Pilar y Susana.

Durante este periodo correspondimos con Gautam Mitra de la Universidad de Brunel, RU. Gautam y su equipo fueron muy amables aceptando a varios de nuestros estudiantes a trabajar con ellos por diversos periodos de tiempo.

Y llegamos al año 2000, donde fuimos a la Universidad Miguel Hernández de Elche (Alicante) a hacernos cargo de una cátedra de Estadística e I-O. Durante este tiempo Rüdiger Schultz nos visitó e iluminó nuestras ideas sobre algoritmos en programación estocástica contemplando el riesgo inherente a la incertidumbre de los parámetros, por lo cual le estaremos siempre agradecidos.

Allí encontré gente encantadora (y grandes trabajadores, hasta abrumar un poco). No quisiera olvidarme de ninguno, pero me gustaría singularizar a Mark Almiñana, Lola Canovas, Lola Esteban, Nati Llorca, Mercedes Landete, Ana Meca, Juan Francisco Monge, Domingo Morales, Eva Ortega, Juan Parra, Alex Rabasa, Angel Sánchez, Joaquin Sánchez Soriano, Javi Toledo y otros. Fueron 7 años que no olvidaré. Junto con su amistad continuamos hoy día una exitosa colaboración científica.

Casi hace dos años que volvimos a Madrid, a la Universidad Rey Juan Carlos, donde espero retirarme en unos años más. Aquí también he encontrado paz y amistad. Me gustaría destacar a todo el dpto. de Estadística e I-O, pero quiero singularizar a tres personas en el mismo, David Ríos y Antonio Alonso Ayuso que me han distinguido con su amistad desde hace años, y Celeste Pizarro, sin cuya colaboración no habríamos alcanzado los resultados de investigación que conjuntamente con Antonio y ella estamos teniendo.

3. Disciplinas más aplicadas

En el periodo de 45 años de vida científica, he podido observar disciplinas de I-O que vienen y van en su aplicación a la vía práctica. Aquellas cuya aplicabilidad se ha mantenido, e incluso incrementado, en estos años (siendo algunas de ellas las disciplinas de matemática más aplicadas hoy día) son las siguientes.

1. programación lineal
2. programación 0-1 mixta
3. programación combinatoria
4. programación reticular
5. programación no-lineal
6. programación estocástica
7. programación nebulosa
8. programación semi-infinita
9. teoría de juegos
10. generación redes neuronales artificiales
11. análisis de conglomerados y reconocimiento de patrones
12. teoría de colas y simulación
13. fiabilidad
14. dinámica de sistemas
15. inteligencia artificial
16. análisis de eficiencia (DEA)

La tecnología correspondiente a estas disciplinas debe integrarse en un sistema informático en el que se ejecuten los modelos y algoritmos que le ayudan a decidir al empresario, por ejemplo, respecto a la política de contratación de recursos humanos, la política de inversiones en plantas y su dimensionamiento, la política de selección de mercados y productos, etc.

4. Aplicaciones más sobresalientes

Es difícil hacer una relación de los campos de aplicación más interesantes de la I-O que haya podido observar directamente durante estos años. Pero mi lista es la siguiente:

1. Gestión de Tesorería
2. Ingeniería Financiera
3. Investigación de Mercados
4. Sistemas Logísticos
5. Diseño de subastas (auctions)
6. Planificación de Inversiones y Gestión del Riesgo
7. Planificación, Gestión y Control de Proyectos
8. Planificación de la Producción y adquisiciones
9. Planificación de la utilización de recursos humanos
10. Expansión de la Capacidad Productiva
11. Secuenciación de Operaciones de Producción
12. Gestión de Ingresos
13. Planificación y Secuenciación de Operaciones de Transporte
14. Ingeniería del Conocimiento
15. Simulación de Sistemas de Ingeniería
16. Planificación y Diseño de Sistemas de Fabricación Flexible
17. Fiabilidad de Sistemas Industriales
18. Planificación del mantenimiento de unidades de producción y generación de energía eléctrica
19. Planificación de la Generación de Energía Eléctrica
20. Planificación del Flujo del Tráfico Aéreo

5. Características más comunes

En primer lugar, el tipo de problemas a abordar, normalmente, pertenece a los dominios de planificación estratégica, planificación táctica y planificación operacional.

Estos problemas son dinámicos, i.e., problemas con condiciones y funciones de mérito propios para cada periodo en el horizonte temporal considerado.

Sus correspondientes modelos uni-periodo están relacionados entre sí, debido a elementos inter-temporales, tales como stock de productos y materias primas, transporte con duración multi-periodo, disponibilidad presupuestaria y rendimiento multi-periodo, ejecución de proyectos con duración multi-periodo, etc.

Una característica muy frecuente es la incertidumbre en la realización de ciertos parámetros a considerar en la toma de decisiones, fundamentalmente, debido al carácter dinámico de los problemas a abordar. Muy frecuentemente, los parámetros inciertos son: la demanda y precio futuros de los productos, el costo y disponibilidad de las materias primas, el costo del dinero, el costo y disponibilidad de otros recursos productivos, etc. La consideración del riesgo que conlleva la incertidumbre en los proyectos relacionados en la lista anterior puede ser transversal en los sectores industriales, pero aquellos en los que con más frecuencia se han desarrollado son los siguientes:

1. fabricación: ordenadores, motores, óptica, automoción, electrodomésticos, etc.
2. transporte: tierra, mar, aire, internet
3. logística en automoción
4. logística en la producción y distribución de petróleo y productos petroquímicos,
5. control del tráfico aéreo
6. sector de la construcción
7. sector eléctrico
8. sector de la alimentación
9. cadenas de suministro
10. ciencias de la salud
11. gestión de recursos hídricos
12. planificación de inversiones públicas y otros.

6. Liderazgo en la ejecución de los proyectos

Las empresas tienen hoy día una gran cantidad de información, y lo realmente importante es extraer de ella el conocimiento que entraña y para esto, sin duda, los métodos de la I-O (y de la Estadística) contribuyen significativamente. En este proceso, evidentemente, el liderazgo en la utilización de la I-O debe tomarlo el empresario, si no los esfuerzos serán poco útiles.

Muchas de las decisiones trascendentales relacionadas con las funciones logísticas tradicionalmente han sido tomadas por las empresas mediante conocimientos empíricos, y no necesariamente con el apoyo o la aplicación de modelos matemáticos. No se puede ignorar que el conocimiento surgido con base en la experiencia es fundamental para las empresas. Sin embargo, la función de la I-O es ayudar a la toma de decisiones mediante una profundización en el manejo de los datos y la organización de la información, apoyándose en el conocimiento empírico desarrollado en la empresa. Los métodos de la I-O deben trabajar de la mano con el conocimiento empírico del recurso humano, para interpretar lo más acertadamente posible la información disponible, la cual debe fluir armónicamente dentro de la compañía.

7. Proyectos más sobresalientes

Los proyectos más sobresalientes en los que hemos estado y seguimos estando envueltos en estos años son los siguientes:

Sin duda, una de las grandes aplicaciones de los métodos de I-O se concentró en el sector del **transporte principalmente terrestre y ferroviario**. Pero en muchos otros sectores de la economía, las compañías hacen uso de métodos de I-O para tomar decisiones trascendentales para su negocio, tal es el caso del **sector eléctrico** (ver Escudero y Pereira, 2000), que se vale de estos recursos para definir cuánta potencia hidro y térmica se va a generar, cuánto volumen de agua se va a utilizar, qué energía se ha de comprar/vender en el mercado spot y en contratos a término, qué inmunización financiera se ha de considerar para gestionar el riesgo, etc.

Otro tanto podría decirse del valor añadido de la utilización de la I-O en otros **sectores energéticos** tales como **el petrolífero y el gasístico**.

En el **sector financiero**, por ejemplo, las decisiones de qué acciones comprar, qué portafolio conformar, qué opciones / futuros adquirir para tener una buena protección contra el riesgo, qué obligaciones tener y cuándo deshacer las posiciones, etc. se apoyan esencialmente en métodos de I-O.

Sector del suministro (Supply Chain Management). Las cadenas de suministro están haciendo énfasis en el trabajo y la implementación de las herramientas que ofrecen los métodos I-O (ver Escudero, 2002). Por ejemplo, una prestigiosa empresa europea en el ramo de la automoción manifestaba que el 80 por ciento del valor agregado de su producto era añadido fuera de la empre-

sa, siendo generado por sus proveedores y los proveedores de sus proveedores, y así sucesivamente. Lo que hace esta empresa es diseñar todo el producto, decidir cuál es la calidad que quieren, contratar los proveedores y pedirles a su vez que subcontraten otros proveedores ya seleccionados para indicarles cómo tienen que producir. En toda esta cadena, en la que se pueden presentar 400 proveedores cruciales o más, desde lo que es la materia prima hasta el producto terminado, hay que definir qué se debe producir, cómo hacerlo, a qué costo y en qué condiciones se debe poner a pie de fábrica en los próximos, sea, seis meses, con la incertidumbre que tienen los precios en el mercado y el comportamiento dinámico de los consumidores. La aplicación de I-O es básica y cada vez más compleja de acuerdo con los eslabones de la misma. Como decimos más arriba, frente a la situación de adquirir nueva maquinaria e invertir en nuevas sedes o penetrar en otros mercados, lo que sin duda afectará a la marcha de la compañía a largo plazo, no se puede prever el aumento del costo de los combustibles u otras vicisitudes de índole social y económica que, obviamente, influirán en los resultados de las decisiones tomadas por el empresario. Sin embargo, la aplicación de métodos I-O permite adelantarse y estimar un conjunto de escenarios que pueden presentarse, para así elegir la mejor opción de respuesta después de un riguroso análisis. No obstante, hemos de insistir, la aplicación de métodos I-O sin utilizar la intuición del empresario que los complementa avalada por su experiencia, sería una mala decisión en la mayoría de las situaciones.

Gestión de Ingresos (Revenue Management, RM). Otro caso piloto de aplicación de la I-O es el problema de la gestión de ingresos como una aplicación de la metodología de optimización estocástica entera. El problema de la gestión de ingresos estudia un mercado en el que es necesario integrar factores externos como, por ejemplo, las motivaciones heterogéneas de los clientes teniendo valoraciones diferentes sobre los productos de la empresa y éstos se ofrecen de forma estándar sobre un rango de periodos de tiempo. Las compañías aéreas han sido los primeros usuarios de RM, en cuyo problema hay grupos de usuarios diferentes (clase business y clase turista, por ejemplo), teniendo ciertamente valoraciones diferentes con respecto al precio que han de pagar por un viaje, clientes que pueden diferenciarse por el momento en el que contratan el vuelo a lo largo de un horizonte temporal dado hasta que se realiza el viaje, etc. Uno de los objetivos adicionales de este tipo de proyectos consiste en desarrollar nuevos esquemas exactos y algoritmos heurísticos para el problema de la gestión de ingresos, así como diseñar la política de precios a ofertar para una determinado viaje dependiendo de una serie de condiciones entre las que se encuentra la antelación con la que se adquiere el billete para cada vuelo. Otros usuarios de metodologías RM son la industria hotelera, las industrias del transporte, alquiler de coches, y reservas de todo tipo en servicios y compra de bienes perecederos.

Sector aéreo. Dada la densidad del tráfico aéreo, es muy importante una adecuada planificación de los vuelos a nivel de una region geográfica, e.g., Euro-

pa, para determinar el horario de salida de los vuelos, la duración de su retraso, normalmente en tierra, el plan de vuelo y el horario de llegada, tal que se cumplan un numeroso conjunto de condiciones impuestas por el organismo controlador y por las propias preferencias de las compañías aéreas. El problema es altamente combinatorio con incertidumbre en las condiciones meteorológicas que limitan la capacidad de despegue y aterrizaje, así como limitaciones en la demanda debido a cancelaciones imprevistas en los planes de vuelo de las compañías. Por tanto, es un problema de gran escala dinámico combinatorio estocástico, siendo un auténtico reto para los investigadores en I-O dado el escaso tiempo de respuesta que se precisa.

8. Relación con la Nueva Economía

El papel que ya están jugando los métodos I-O en la "Nueva Economía", y que se incrementará enormemente, es debido a la característica de escala que ésta tiene. En los esquemas B2B (Business-to-Business) y, sobretudo, en las relaciones B2C (Business-to-Customer), los centros logísticos conectados en la Red están centralizando volúmenes de oferta y demanda de productos y servicios que, previamente, se recibían en sitios físicos distintos y no conectados entre sí, pues muy frecuentemente eran empresas diferentes. En general, hoy día, un centro logístico recibe un volumen de demanda de diversos productos que anteriormente se efectuaba a diversas entidades, e.g., tiendas y depósitos localizados en sitios distintos. Por tanto, estos centros logísticos en Red precisan optimizar: la cadena de suministro, los inventarios y la logística del transporte de productos, desde los orígenes hasta los destinos finales, con un volumen de movimiento y un nivel de complejidad de gestión y responsabilidad de decisión enormemente superiores a los que se tenían en la época anterior en la que podía ocurrir que el volumen atomizado y, por tanto, reducido, del negocio a menor escala, no precisara de los métodos I-O con la misma intensidad. En cambio, las oportunidades para utilizar estas técnicas y apoyar una mejor toma de decisión, con el consiguiente beneficio económico y de calidad de servicio que ello supone en la "Nueva Economía", son muy grandes.

9. Limitaciones en la utilización de métodos de I-O

Existen una serie de obstáculos que se presentan para el desarrollo y la aplicabilidad de la I-O. La empresa hoy día dispone de una gran cantidad de información. Podemos hablar entonces de almacenes de datos y bases de datos. En el primer caso no se sabe qué datos se tienen y, si se sabe, se ignora cómo utilizarlos. En el segundo caso, los datos forman una estructura para que sea manejada eficientemente. Con frecuencia lo que se tiene es una inmensa cantidad de datos, pero las bases de datos como bases de conocimiento no están disponibles y por tanto los métodos I-O son ineficientes.

Otra de las limitaciones está definida por la carencia, muy frecuente, de conocimientos del posible valor añadido que puede proporcionar la I-O. El divorcio entre universidad y empresa es ahora menor, pero todavía nos queda mucho camino por recorrer a ambas instituciones, máxime cuando una necesita esencialmente de la otra para crecer juntas en aras del desarrollo social. Es bueno ahora mirar hacia dónde puede dirigirse el estudio de la I-O.

Durante mucho tiempo fue una rama de las matemáticas en la que se desarrollaban modelos y aplicaciones que muchas veces no se habían solicitado, sin dejar de lado los grandes desarrollos algorítmicos. En resumen, se publicaban trabajos que frecuentemente no eran aplicados en una situación real y que pasaban a lo que un investigador muy conocido, Paco Quintana, denomina "panteón de los modelos ilustres". No obstante, aquellos grandes desarrollos propiciaron las grandes aplicaciones de hoy día. Precisamos continuar profundizando en investigaciones teóricas porque aún no se sabe hasta donde podemos llegar. Por ejemplo, hace 40 años se podían resolver problemas de muy pocas condiciones y variables. Hoy se formulan modelos con decenas y centenares de miles de condiciones y variables e, incluso, dimensiones superiores, pues ya hay aplicaciones con millones de condiciones y variables. Como consecuencia, los desarrollos teóricos de modelización y algorítmicos son enormes.

Sin menoscabar la investigación en matemática pura (fuente de la que surgen las aplicaciones robustas), una de las grandes direcciones que yo aconsejaría a los jóvenes universitarios consiste en la profundización en la disciplina de modelización y en la adecuación de nuestros conocimientos a la realidad empresarial. Un buen instrumento para ello es el establecimiento de convenios estables con las empresas por parte de nuestras instituciones universitarias y centros de investigación, con los siguientes objetivos, entre otros:

1. Prácticas tutorizadas de estudiantes en la empresa
2. Organización conjunta de Seminarios
3. Proyectos conjuntos de investigación aplicada en Áreas Estratégicas de Negocio
4. Invitación al mundo empresarial a impartir conferencias en cursos regulares universitarios
5. Programas conjuntos de desarrollo de ejecutivos
6. Organización conjunta de mesas redondas sobre temas estratégicos empresariales
7. Asesoría de las empresas en la confección de programas de cursos regulares universitarios
8. Estancias del profesorado en la empresa

10. Programación estocástica

No me resisto a terminar estas consideraciones en relación con nuestra profesión sin incitar, aunque sea brevemente, a la investigación en programación estocástica entera, mi campo de especialidad desde hace bastante años. La optimización es una de las herramientas matemáticas para la toma de decisiones más acertada en nuestros días. Frecuentemente, hay modelos deterministas en los cuales, entre las decenas de miles de restricciones, aparecen frecuentemente variables continuas, enteras y binarias (0-1). Con las herramientas actuales de la I-O, este tipo de modelos de optimización 0-1 mixtos no son difíciles de resolver, al menos, para problemas de dimensiones moderadas.

Sin embargo, desde mediados del siglo XX, se reconoce el hecho de que la optimización determinista tradicional no es apropiada para capturar el comportamiento real de la incertidumbre en la mayoría de las aplicaciones del mundo real. La incertidumbre es la llave en muchos problemas de decisión. Finanzas, planificación aérea, mercado eléctrico y planificación de la producción son sólo unos pocos ejemplos de áreas en las cuales ignorar la incertidumbre puede llevar a decisiones peores, incluso equivocadas.

Así, la Programación Estocástica ha creado una aproximación al tratamiento y utilización de la información que se dispone sobre la incertidumbre. Sin embargo, muchos años han pasado hasta que la teoría básica de programación estocástica ha ofrecido una variedad de modelos que integran de forma adecuada la incertidumbre en sus problemas: modelos bi- o multi-etápicas, medidas de riesgo, etc. Estos modelos son extremadamente difíciles de resolver, ya que combinan las dificultades de los modelos lineales y combinatorios con las dificultades inherentes a la Programación Estocástica.

En los últimos años se está produciendo un desarrollo algorítmico para el tratamiento de la incertidumbre en problemas de Programación Matemática en los que, además de los parámetros conocidos y las variables de decisión, existen otros parámetros exógenos desconocidos por el modelizador en el momento de la toma de decisiones y sobre los que no tiene control. Un adecuado tratamiento de la información de que se dispone sobre estos parámetros es crucial para la obtención de soluciones al problema que, no pudiendo ser óptimas para todos y cada uno de los problemas deterministas que corresponden a la realización de dichos parámetros, sí sean soluciones robustas. El término *robusto* se utiliza para definir soluciones aceptables para cualquier realización de los parámetros inciertos.

El problema de la incertidumbre se ha venido tratando regularmente en la literatura sobre Programación Matemática desde hace más de 50 años, época en la que se publicaron independientemente los trabajos seminales sobre la materia debidos a Beale (1955) y Dantzig (1955). No obstante, dado el alto grado de sofisticación que la resolución del problema requiere, no ha sido posible un

tratamiento para resolver problemas prácticos de Programación Matemática con incertidumbre hasta la eclosión de las Ciencias de la Computación en los años 80 y 90. En los avances teóricos en Programación Estocástica se trata la incertidumbre a base de utilizar el riesgo con esquemas en los mismos modelos y algoritmos de Programación Matemática.

Por otra parte, es muy frecuente observar la reducción de toda la información estocástica que se tiene sobre el problema a meros promedios de los valores de los parámetros inciertos. De esta forma, en lugar de proporcionar soluciones para un problema estocástico, se proporcionan soluciones para un problema determinista que puede que no exista, con el riesgo inherente que conlleva la solución proporcionada, o, incluso, puede que no sea factible para muchos escenarios. Por el contrario, los tratamientos estocásticos al problema de optimización se abordan desde dos perspectivas distintas. Una de ellas asume que se conocen, o se aproximan, las distribuciones probabilísticas seguidas por los diversos parámetros inciertos, y el objetivo consiste en optimizar el valor esperado en la función objetivo sujeto a dos tipos de condiciones, a saber, las condiciones deterministas y aquellas condiciones con elementos probabilísticos. La satisfacción de estas condiciones consiste en soluciones cuyo valor en las condiciones exige un valor mínimo para la probabilidad de que las correspondientes funciones en dichas condiciones superen (o no superen, dependiendo de los casos) un determinado umbral, chance constraints (ver Carnes y Cooper, 1959). Esta perspectiva se encuentra con el inconveniente de requerir conocer o estimar, con bastante precisión, las correspondientes distribuciones probabilísticas y, por otro lado, los desarrollos algorítmicos hoy día disponibles no permiten más que abordar problemas con pequeñas dimensiones (varios cientos de variables) cuando los problemas reales requieren fácilmente cientos de miles de condiciones y variables.

La segunda perspectiva con la que hoy día se pueden abordar problemas de optimización bajo incertidumbre es la denominada *Programación Estocástica vía árboles de escenarios*. Se considera un número finito de posibles realizaciones futuras y se analiza el conjunto de secuencias de dichas realizaciones. Estas secuencias se denominan *escenarios*. En la mayor parte de los problemas reales, a pesar de existir infinitas posibles realizaciones de una variable aleatoria, éstas se pueden reducir a un número finito de escenarios *representativos*. Uno de los problemas cruciales a resolver con este tipo de metodología es la determinación del conjunto adecuado de escenarios a contemplar. Recientemente, se han efectuado nuevos desarrollos para obtener modelizaciones eficientes en Programación Estocástica vía árboles de escenarios que permiten la resolución de problemas de grandes dimensiones. Estos desarrollos se presentan bajo el marco conceptual de recursión simple y completa. Se utiliza el principio de *no anticipatividad* para proporcionar soluciones robustas que optimizan el valor esperado en la función objetivo, tipificando las variables en el conjunto denominado implementable y en el conjunto denominado no implementable. La solución para las variables

implementables es única, independiente del escenario que pueda acaecer, y, en cambio, se proporciona una solución para cada grupo de escenarios en cada etapa para las variables no implementables, pero teniendo en cuenta todos y cada uno de los escenarios de una forma simultánea a través de las variables implementables. Muy frecuentemente, los esquemas de modelización y los desarrollos algorítmicos para su resolución, basados en diversos tipos de descomposición (por etapas, Lagrangeana, Benders, Bifurcación-y-Fijación Coordinada, etc.), así como en programación dinámica estocástica permiten abordar problemas que podrían anteriormente considerarse intratables dadas sus dimensiones. Ver Escudero (2009) y sus referencias. Ello permite la utilización de computación en paralelo, una de las disciplinas que en mi opinión tiene mayor futuro, no sólo en programación estocástica sino en programación matemática en general.

Por último, creo que la Programación Estocástica es una rama de la I-O, a caballo de la Estadística, a la que creo debemos dedicarle una gran atención por la complejidad y el potencial de aplicación que tiene.

Agradecimientos

Agradezco a Ana Meca, editora asociada de BEIO, la sugerencia de que comparta con los lectores de BEIO algunas reflexiones sobre lo que es y creo que puede ser la Investigación-Operativa.

Referencias

- [1] Beale, E.M.L. (1955). On minimizing a convex function subject to linear inequalities. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* **17**:173-184.
- [2] Charnes, A. y W.W. Cooper (1959) Chance-constrained programming. *Management Science* **5**:73-79.
- [3] Dantzig, G.B. (1955). Linear programming under uncertainty. *Management Science* **1**:197-206.
- [4] Escudero, L.F. (2002). A whirlwind tour on some industrial applications of mathematical programming. *OR/MS Today* **29(2)**:46-49, 2002.
- [5] Escudero, L.F. (2009, aparecerá) On Branch-and-Fix Coordination and Lagrangean Substitution and Decomposition for multistage stochastic mixed integer programming. *TOP*. Invited paper, doi:10.1007/s11750-009-0090-7.
- [6] Escudero, L.F. y M. Pereira (2000). New trends and OR/MS opportunities in the electricity open market *OR/MS Today* **27(2)**:42-46.

Acerca del autor

Laureano F. Escudero es catedrático de Estadística e Investigación Operativa en la Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles (Madrid). Ha sido miembro de los Centros Científicos de IBM en Madrid y Palo Alto (California), del Centro de Tecnologías de la Producción de IBM Alemania, Sindelfingen y del IBM T.J. Watson Research Center, Yorktown Heights (NY). Ha sido director del dpto. de Ingeniería de Sistemas de Apoyo a la Decisión en Iberdrola Ingeniería y Consultoría. Durante el periodo 2003-2004 ha sido Presidente de EURO, The Association of European Operational Research Societies. Es autor de varios libros y más de cien artículos científicos. Sus actuales líneas de investigación son optimización combinatoria, programación estocástica entera, métodos de descomposición y computación en paralelo.