REVISTA DE MÉTODOS CUANTITATIVOS PARA LA ECONOMÍA Y LA EMPRESA (5). Páginas 67–115.
Junio de 2008. ISSN: 1886-516X. D.L: SE-2927-06.
URL: http://www.upo.es/RevMetCuant/art20.pdf

Evaluación y clasificación de las técnicas utilizadas por las organizaciones, en las últimas décadas, para seleccionar proyectos

Fernández Carazo, Ana
Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica.
Universidad Pablo de Olavide
Correo electrónico: afercar@upo.es

Gómez Núñez, Trinidad
Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas). Universidad de Málaga
Correo electrónico: trinidad@uma.es

Guerrero Casas, Flor M.
Departamento de Economía, Métodos Cuantitativos e Historia Económica.
Universidad Pablo de Olavide
Correo electrónico: fguecas@upo.es

Caballero Fernández, Rafael
Departamento de Economía Aplicada (Matemáticas). Universidad de Málaga
Correo electrónico: r_caballero@uma.es

RESUMEN

La metodología empleada por las organizaciones empresariales para distribuir su presupuesto y seleccionar qué proyectos, entre todos los posibles candidatos, deben ser ejecutados para cubrir sus necesidades ha evolucionado mucho desde que dichas organizaciones empezaron a apoyar sus decisiones de selección en algún modelo matemático. El propósito de este trabajo es realizar un análisis descriptivo y comparativo de las diferentes técnicas empleadas a lo largo del tiempo, incorporando un pequeño ejemplo que clarifique su funcionamiento y poniendo de manifiesto tanto sus ventajas como sus inconvenientes. En alguna medida, estos inconvenientes fueron motivando su evolución hacia técnicas cada vez más complejas y completas hasta llegar a nuestros días. Nuestro estudio ha permitido observar, por un lado, que la evolución de las organizaciones ha llevado a que cambie sustancialmente el problema de selección, pasando de seleccionarse proyectos a seleccionarse y planificar carteras de proyectos y, por otro lado, que el problema aún no está solucionado, ya que es necesario lograr un modelo global que resuelva cualquier problema de selección y planificación temporal de cartera de proyectos.

Palabras clave: cartera de proyectos; selección de proyectos; técnicas de clasificación.
Clasificación JEL: C600; C610.
2000MSC: 90B50; 91B82.

Artículo recibido el 25 de mayo de 2008 y aceptado el 3 de junio de 2008.

Evaluation and classification of the techniques used by organizations in the last decades to select projects

ABSTRACT

The methodology used by business organizations to distribute their budget and select which projects –among all potential candidates– must be carried out to satisfy their needs has changed considerably since the organizations started to support their selection decisions in a mathematical model. The purpose of this paper is to provide a descriptive and comparative analysis of the different techniques used over time; we also present a small example to clarify their function, and thereby we show both its advantages and disadvantages. These drawbacks were the principal cause of their evolution towards more completed and sophisticated techniques. This study highlights two aspects: first, the evolution of the organizations has changed the problem of selection from *project selection* to *portfolio selection and scheduling*, and secondly, the problem is not solved yet, and we need a global model to resolve whatever problem of project portfolio scheduling and selection.

Keywords: portfolio; project selection; classification techniques.
JEL classification: C600; C610.
2000MSC: 90B50; 91B82.

1. Introducción

En este trabajo pretendemos realizar un estudio cronológico que muestre el *estado del arte* en el modo de actuar de las organizaciones empresariales para resolver un problema clásico en Economía: cómo distribuir los recursos escasos de la organización entre el conjunto de alternativas o proyectos candidatos a financiar y llevar a cabo. El problema básico de planificar qué proyectos deben ser seleccionados y ejecutados para un periodo temporal posterior se suele plantear en las organizaciones de manera sucesiva a lo largo de la vida de la organización. El modo de actuar por parte de las organizaciones a lo largo de los años ha ido cambiando; y este diferente modo de actuar y seleccionar es el que queremos presentar en este estudio, analizando las características de cada una de estas técnicas utilizadas hasta llegar a nuestros días.

Inicialmente, los elementos que intervenían en el proceso de selección de proyectos eran fácilmente manejables por sus dimensiones (presupuesto, número de proyectos candidatos, periodo temporal, etc.) y los analistas o gestores empresariales tomaban las decisiones de qué proyectos seleccionar de manera intuitiva o basándose en modelos sencillos. Sin embargo, desde mediados del siglo pasado, la creciente competencia entre empresas y la necesidad de optimizar sus recursos lleva a que los gestores comiencen a apoyar sus decisiones de selección de proyectos en modelos matemáticos (Baker y Pound, 1964; Baker, 1974; Baker y Freeland, 1975). De esta forma, las empresas, en la mayoría de los casos de gran tamaño, comienzan a poseer una mayor disponibilidad de recursos que deben distribuir y planificar entre aquellos proyectos potenciales que pretenden responder a las necesidades crecientes.

La compleja situación en la que se encuentran las empresas a la hora de determinar qué proyectos seleccionar ha llevado a que en las últimas décadas se produzca un cambio en la estructura y mentalidad de las organizaciones, en la que se ha pasado de considerar como objetivo la selección de proyectos individuales (modo de actuar inicial por parte de las organizaciones – Pessemier y Baker, 1971; Easton, 1973; Gear, 1974; Howard y Metheson, 1984; etc–) a la búsqueda de grupos o carteras de proyectos (modo de actuar actual –Santhanam y Kyparisis, 1995; Lee y Kim, 2001; Gustafsson y Salo, 2005; etc.–), en los que se desea no solo seleccionar los mejores con los recursos disponibles, sino determinar el conjunto de ellos que aprovechen de la mejor manera dichos recursos. Todo ello ha llevado a que la elección de la cartera de proyectos se convierta en una tarea mucho más compleja, que requiere para su resolución modelos que se ajusten a las necesidades del problema y que permitan una correcta toma de decisiones en el campo de la selección y planificación temporal de los proyectos.

El estudio aquí presentado comienza en la primera sección con una contextualización de nuestro objeto de estudio, esto es, por qué surge este trabajo y qué se ha entendido tradicionalmente con los términos *proyecto* y *cartera de proyectos*. Una vez aclarados esos conceptos, presentaremos en la segunda sección, en orden cronológico, las diferentes técnicas o métodos de resolución utilizados para seleccionar proyectos y carteras de proyectos hasta nuestros días, ilustrando cada una de ellas con un ejemplo que facilite su comprensión, mostrando en cada momento las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas analizadas. Finalmente, y a modo de conclusión, observaremos la necesidad que existe de avanzar un poco más en lo analizado hasta este momento, con el requerimiento de un nuevo modelo global que tenga en cuenta tanto los aspectos hasta ahora considerados como aquellos que creamos que no han sido tratados en profundidad hasta este momento, permitiendo a cualquier organización solucionar de la manera más sencilla posible el problema de selección y planificación temporal de una cartera de proyectos.

2. Contextualización del problema y algunas definiciones básicas

2.1 Contextualización del problema

Este trabajo surge ante el deseo de responder a un problema común en todas las organizaciones y que consiste en cómo invertir y gestionar los recursos escasos entre una serie de proyectos candidatos. Por tanto, pretendemos analizar un problema de decisión crucial, que debe ser abordado por toda organización en diferentes momentos de su vida para garantizar su eficiencia y, posiblemente, su supervivencia. Será este problema el que vamos a analizar, presentando los diferentes modos de actuar a lo largo de los años por las diferentes organizaciones; es decir, cómo han ido resolviendo este problema las diferentes organizaciones empresariales para determinar en última instancia qué proyectos deben ser seleccionados según la información que se disponía en cada momento.

Para ello, nos ha parecido fundamental comenzar este estudio definiendo qué entendemos en este contexto por *proyecto* y por *cartera de proyectos*, observando sus diferencias fundamentales, ya que estas diferencias han marcado un cambio fundamental en la metodología empleada en los últimos años.

2.2 Definiciones: proyecto y cartera de proyectos

En nuestro contexto, un *proyecto* es un esfuerzo temporal, único e irrepetible que, consumiendo un conjunto de recursos, busca satisfacer unos objetivos específicos en un periodo de tiempo determinado. Hemos de señalar que, en este trabajo, consideraremos un proyecto como un todo, sin tener en cuenta que se puede desglosar en un conjunto de actividades o tareas; es decir, lo contemplaremos desde una perspectiva agregada (Kimms, 2001) y, además, que no puede ser fraccionado. No obstante, si existen diferentes versiones de un mismo proyecto, tales versiones serán tratadas como propuestas individuales e indivisibles, es decir, como diferentes proyectos.

Por otra parte, un *portfolio* o *cartera de proyectos* es un conjunto de proyectos que, llevados a cabo en un determinado periodo de tiempo, comparten una serie de recursos y entre los que pueden existir relaciones de complementariedad, incompatibilidad y sinergias producidas por compartir costes y beneficios derivados de la realización de más de un proyecto a la vez (Fox *et al.*, 1984). Ello implica que no es suficiente comparar un proyecto con otro, sino que es necesario comparar grupos de proyectos (Chien, 2002), buscando la cartera de proyectos eficiente que mejor se adapte a las necesidades de la organización.

Una vez analizados los conceptos de *proyecto* y *cartera de proyectos*, pasaremos a analizar las técnicas que han sido utilizadas a lo largo de los años para seleccionarlos.

3. Evolución histórica de las técnicas empleadas para seleccionar proyectos

Desde sus orígenes, las primeras organizaciones tuvieron que decidir en todo momento cómo invertir y gestionar sus recursos escasos entre una serie de proyectos potenciales, a qué alternativas dedicar una mayor cantidad de tiempo, personal, etc. Tradicionalmente, tal y como señalan Moore y Baker (1969), las empresas no utilizaban ninguna técnica específica para seleccionar proyectos, sino que este proceso de toma de decisiones se realizaba de manera subjetiva, recopilando la mayor cantidad de información disponible de cada una de las alternativas (proyectos candidatos) y con ella tomar una decisión, ya que se consideraba que no existían modelos que pudiesen resumir o agregar toda la información y aportar una conclusión relevante. A pesar de que durante muchos años se mantuvo ese modo de actuar, las organizaciones han evolucionado incrementando su tamaño y, por tanto, sus recursos y necesidades, ello y el hecho del incremento de la competencia entre las organizaciones ha llevado a los agentes decisores a buscar una estrategia más racional a la hora de determinar qué proyectos son los que deben ser seleccionados y ejecutados. Los empresarios comienzan a considerar necesario encontrar alguna escala de medida común que permitiera la comparación entre alternativas, dando lugar al estudio de las primeras técnicas de selección y clasificación entre proyectos candidatos.

A continuación describiremos brevemente aquellas técnicas que han sido más utilizadas a lo largo de los años y, aunque tales técnicas no son exclusivas de la selección de proyectos, aquí vamos a considerarlas bajo esta perspectiva. Además, analizaremos cada procedimiento mostrando un ejemplo sencillo que ayude a clarificarlo. Hemos de señalar que no pretendemos ser exhaustivos en esta revisión, sino sencillamente mostrar la evolución que ha tenido el tratamiento del problema de la selección de proyectos y carteras de proyectos.

En general, se parte de la existencia de un conjunto de I alternativas o proyectos candidatos $P = \{ p_1, p_2, ..., p_I \}$. Cada uno de ellos será evaluado en función de un conjunto de n criterios $\{a_1, a_2, ..., a_n\}$, que dan lugar a la matriz de datos $A = (a_{ij})$, donde a_{ij} representa el valor del criterio j $(j = 1,2,...,n)$, para el proyecto i $(i = 1, 2, ..., I)$. El problema consiste en ayudar al centro decisor a seleccionar, dentro del conjunto de I proyectos candidatos, un subconjunto de este que, verificando la disponibilidad de recursos, sea el más adecuado de acuerdo con los objetivos perseguidos.

A lo largo de los años, muchos han sido los estudios publicados relacionados con esta problemática de selección de proyectos y cartera de proyectos, de los que solo unos pocos presentan una clasificación (categorización) de las técnicas o posibles metodologías utilizadas para dicha selección. Los primeros estudios que con cierto éxito realizaron una clasificación fueron los de Baker y Pound (1964), Baker (1974) y Baker y Freeland (1975). Todos ellos establecen que las técnicas se pueden clasificar fundamentalmente en dos categorías: *técnicas de medidas de beneficio* y *técnicas de selección de proyectos y asignación de recursos*.

Esta primera clasificación, impulsada principalmente por Baker, ha sido aceptada y posteriormente ampliada y matizada por autores como Liberatore y Titus (1983), Martino (1995), Heidenberger y Stummer (1999), Archer y Ghasemzadeh (1999) y Dye y Pennypacker (1999). Todos estos autores consideran que se pueden establecer tres grupos: los dos anteriores, con la salvedad de que el segundo de los grupos se refiere a *métodos de programación matemática*, y un tercer bloque residual que estará compuesto por el *resto de técnicas* que se utilicen para seleccionar proyectos o carteras de proyectos y que no estén integrados en ninguno de los dos bloques anteriores. Nosotros, basándonos en las clasificaciones ya establecidas, consideramos tres grupos de técnicas y proponemos dentro de cada uno de ellos una subclasificación.

A) **Técnicas de medidas de "beneficio"**, dentro de las cuales podemos encontrar lo siguiente: A_1) modelos económicos, A_2) modelos de teoría de la decisión: tablas de decisión y árboles de decisión y A_3) métodos basados en pesos y ordenación (ranking).

B) **Otras técnicas,** donde las más utilizadas han sido los análisis: B_1) cluster y B_2) DEA.

C) **Modelos de programación matemática**, en los que podemos distinguir: C_1) programación monobjetivo, C_2) programación multiobjetivo y C_3) programación por metas.

A continuación, y una vez descritos los tres bloques principales, iremos analizando las diferentes técnicas utilizadas. El orden que seguiremos viene marcado por la complejidad, cada vez mayor, que se pretende resolver, lo cual ha marcado, en cierto modo, la utilización de cada técnica a lo largo de los años.

A) Técnicas de medidas de "beneficio", estas consideran la palabra beneficio en sentido genérico (nivel de satisfacción, utilidad, algún tipo de medida económica, etc.). Estos métodos evalúan los *proyectos individualmente* basados en algún aspecto (económico, o de otro tipo), realizando a partir de este criterio una ordenación de ellos para, posteriormente, ir seleccionando aquellos proyectos en el orden anteriormente establecido, hasta agotar el presupuesto disponible.

A_1) Modelos económicos

Los primeros estudios de interés relacionados con la selección de proyectos, tal y como establece Jackson (1983), se realizaron a finales de la década de los cuarenta del siglo XX por parte de empresas americanas en sectores como el químico, aeronáutico, industrias petrolíferas, etc., en los que el coste de los proyectos era enorme. Su auge no comienza hasta la década de los sesenta de ese mismo siglo, momento en el que los trabajos se apoyan principalmente en métodos económicos. Tales métodos evalúan los proyectos en función de: su sostenibilidad financiera (ingresos y costes económicos) en el tiempo, sin incluir en su valoración aspectos no cuantificables económicamente. Las técnicas utilizadas seleccionarán los proyectos teniendo en cuenta el movimiento de flujo de dinero que se prevé tendrá cada proyecto a lo largo de todo su ciclo de vida, para lo que es necesario establecer o estimar cuáles serán las necesidades financieras de cada uno de los proyectos para su futuro desarrollo.

Los métodos económicos más comunes son: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Rentabilidad (TIR), periodo mínimo de recuperación de la inversión y ratio beneficio-coste. A continuación realizaremos una breve descripción de cada uno de ellos:

$A_{1.1}$) Valor actual neto de los beneficios netos de un proyecto (VAN)

Este método compara los flujos de ingresos y gastos originados por el desarrollo de un proyecto; esto es, el flujo neto de caja $\left(\mathrm{Q_t} = \mathrm{cobros_t} - \mathrm{pagos_t}\right)$ del año *t* es descontado al momento de valoración de la operación mediante una tasa de interés. Aunque esta tasa (*r*) puede ser variable y dependiente del periodo temporal, normalmente se utiliza la existente en el mercado en el momento de valoración.

Como partimos de la existencia de *I* proyectos candidatos, $P = \{ p_1, p_2, ..., p_I \}$, calculamos por tanto, *I* diferentes valores actuales netos, es decir, uno para cada uno de los proyectos. Para cada uno de los proyectos, si su VAN_i es positivo, ello implica que el valor de los ingresos es superior al de sus gastos y si este es negativo lo contrario, por lo que si $\mathrm{VAN_i} \geq 0$ el proyecto será potencialmente financiable, mientras que $VAN_i < 0$ podrá ser rechazable. Una vez calculado el valor actual de la inversión de todos los proyectos, estos se ordenarán en función del resultado obtenido, financiándose en primer lugar aquellos para los que el *VAN* es superior, hasta que se agote el presupuesto disponible.

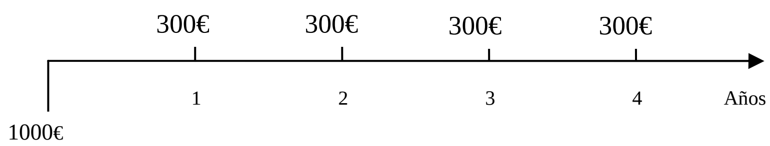
$$VAN = -C + \frac{Q_1}{(1+r)} + \frac{Q_2}{(1+r)^2} + \ldots\ldots + \frac{Q_T}{(1+r)^T}$$

donde C es el desembolso inicial y Q_t el flujo neto de caja para el periodo *t*.

Este método presenta como principal ventaja que tiene en cuenta el perfil temporal de los cobros y pagos. Por otro lado, también podemos encontrar dos inconvenientes principales. Por un lado, que en el momento de la valoración deben ser conocidos tanto los ingresos como los gastos futuros (en caso de que estos valores no sean conocidos, deben ser estimados con el problema de que estas aproximaciones pueden no ser del todo fiables). La segunda dificultad recae en el desconocimiento de la tasa de descuento a utilizar, considerando generalmente algo que no es real: trabajar bajo la hipótesis de la existencia de un mercado financiero perfecto, en el que los flujos positivos son reinvertidos a una tasa *r* de interés y los negativos son financiados a la misma tasa.

A continuación, presentamos un supuesto práctico que iremos resolviendo mediante los diferentes métodos económicos que analizaremos a lo largo de este apartado (A_1) y que nos servirá para mostrar, por un lado, el funcionamiento de cada una de las técnicas presentadas y, por otro, las diferencias existentes entre ellas.

Supuesto 1. La empresa Caramelo S.A. presenta un proyecto de inversión que consiste en adquirir una maquinaria industrial de algodón dulce que permita obtener suficiente algodón de caramelo para venderlo en las múltiples ferias de la Comunidad. Este proyecto requiere de una inversión inicial de 1000€, destinada a financiar la compra tanto de la maquinaria como del azúcar coloreado necesaria para los cuatro años (T=1,…,4) que se estima tiene de vida útil la máquina. Este gasto lo consideraremos como G0 =1000€ (supondremos que no se realizan gastos para el resto de períodos de tiempo) y se espera un ingreso anual de I1= I2= I3 = I4 =300€ por la venta del algodón de caramelo. El tipo de interés de la operación, para todo el horizonte temporal, es del r = 6% y la estructura de la operación la siguiente:



El VAN_i de la inversión para este proyecto es de 39.53€ y representa el beneficio neto de la inversión. Su cálculo es el siguiente: $\mathrm{VAN_i} = \frac{300}{1.06} + \frac{300}{1.06^2} + \frac{300}{1.06^3} + \frac{300}{1.06^4} - 1000 = 39.53€$ ·

A$_{1.2}$) Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) o tasa de ganancia económica

Esta técnica calcula la tasa para la que el *cash-flow* de la operación para un proyecto concreto p_i sea 0, esto es, que el $\mathrm{VAN}_i = 0$, por tanto:

$$\mathrm{VAN_i} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad -\mathrm{C} + \frac{\mathrm{Q}_1}{(1+\mathrm{TIR})} + \frac{\mathrm{Q}_2}{(1+\mathrm{TIR})^2} + \ldots.. + \frac{\mathrm{Q}_{t-1}}{(1+\mathrm{TIR})^{\mathrm{T}-1}} + \frac{\mathrm{Q_T}}{(1+\mathrm{TIR})^{\mathrm{T}}} = 0$$

Una vez calculada la tasa interna de rentabilidad (TIR_i), podemos comparar esta con el coste de financiación del proyecto p_i. Generalmente se considera que el coste de financiación de un proyecto es la tasa de mercado *r* que nos ha servido para calcular el VAN de dicho proyecto *i*. Así, cuando:

$$\begin{array}{ll} TIR_i \geq r & \Rightarrow \quad Inicialmente\ aceptamos\ realizar\ proyecto\ p_i \\ TIR_i < r & \Rightarrow \quad Inicialmente\ rechazamos\ realizar\ proyecto\ p_i \end{array}$$

Aunque teóricamente la tasa TIR_i se suele comparar con la tasa de mercado *r* y ello nos lleva a aceptar o rechazar esa inversión, el agente decisor debe analizar esas comparaciones con cuidado y siendo conscientes de que esta consideración es bastante rígida, ya que la TIR_i no es más que la rentabilidad relativa de la inversión *i* y en algunos casos puede ser excesivo compararla con la tasa de mercado. Además, se está suponiendo que los flujos positivos son reinvertidos a una tasa igual a TIR y los negativos son financiados a la misma tasa.

En el Supuesto 1 obtendríamos una $TIR_i = 7.71\%$. El cálculo se realiza de la siguiente forma:

$$0 = \frac{300}{1+TIR} + \frac{300}{(1+TIR)^2} + \frac{300}{(1+TIR)^3} + \frac{300}{(1+TIR)^4} - 1000 \quad \Rightarrow \quad TIR = 7.71\%$$

Para poder seleccionar un grupo de proyectos dentro de los candidatos, tendremos que calcular la *TIR* para cada uno de ellos y comparar los resultados obtenidos y financiar proyectos en función de los recursos existentes, en orden de mayor a menor valor de TIR_i.

A$_{1.3}$) Periodo mínimo de reembolso o recuperación de la inversión

Esta medida establece el tiempo mínimo que tarda en amortizarse la inversión inicial, esto es, desde que comienza el proyecto p_i hasta que se recupera la inversión, momento en el que el *cash-flow* llega a ser positivo, obteniéndose a partir de ese momento beneficios netos.

Para el ejemplo que estamos estudiando, Supuesto 1, el periodo mínimo de reembolso de la inversión se produce a los cuatro años, como se puede observar a continuación:

$$\mathrm{VAN_i} = \frac{300}{1.06} + \frac{300}{1.06^2} + \frac{300}{1.06^3} - 1000 = -198.09€\,;$$
$$\mathrm{VAN_i} = \frac{300}{1.06} + \frac{300}{1.06^2} + \frac{300}{1.06^3} + \frac{300}{1.06^4} - 1000 = \mathbf{39.53€}$$

Al igual que en el resto de técnicas o métodos económicos (A_1), tendremos que realizar este cálculo para cada uno de los proyectos y se seleccionarán aquellos proyectos que presenten un menor *periodo de recuperación de la inversión.*

$A_{1.4}$) Ratio beneficio-coste (BCR)

Esta técnica constituye otro procedimiento para comparar el valor actual de los ingresos de un proyecto p_i frente al valor actual de sus costes. Aunque este ratio es conocido como ratio beneficio-coste está representado por la relación *ingresos/gastos*, donde los ingresos y los gastos o costes se calculan actualizando sus corrientes futuras:

$$\mathrm{BCR_i} = \mathrm{VAIngresos_i} / \mathrm{VACostes_i}\,.$$

Este ratio será mejor para el agente decisor cuanto mayor sea su valor. Así, se aceptará un proyecto si este es mayor o igual a la unidad y se rechazará cuando sea menor que la unidad:

$$\mathrm{VAN_i} \geq 0 \;\Rightarrow \mathrm{BCR_i} \geq 1 \rightarrow \text{el proyecto i se aceptaría}$$
$$\mathrm{VAN_i} < 0 \;\Rightarrow \mathrm{BCR_i} < 1 \rightarrow \text{el proyecto i se rechazaría}$$

Siguiendo con el ejemplo considerado:

$$\mathrm{BCR_i} = \frac{\frac{300}{1.06} + \frac{300}{1.06^2} + \frac{300}{1.06^3} + \frac{300}{1.06^4}}{1000} = 1.0395\,.$$

Esta técnica, tal y como sostienen Smith y Baker (1999), presenta un inconveniente fundamental para seleccionar proyectos, ya que solo muestra un índice de relación (medida relativa) y no un valor concreto que nos permita decidir entre proyectos alternativos.

Una vez descritas las cuatro técnicas anteriores, queremos hacer notar que el orden alcanzado por los proyectos en cada una de ellas no tiene por qué coincidir, pero sí que pueden existir algunos proyectos que muestren mejores resultados para la mayoría de ellas.

Muchos han sido los autores que han utilizado este tipo de análisis para seleccionar proyectos. Algunos ejemplos son los trabajos desarrollados por Freeman (1982), Ellis (1984), Graves y Ringuest (1991), Meredith y Mantel (1999) y Hartmann y Hassan (2006).

La principal ventaja de las técnicas económicas es que son muy sencillas de comprender por parte de los decisores y directivos de las empresas, ya que no necesitan utilizar modelos matemáticos complejos. Este ha sido el principal aspecto que ha llevado a su gran aplicación a lo largo de los años. A pesar de la extensión de su uso, existen numerosos estudios como el de

Cooper *et al.* (2001), que demuestran que los resultados presentados por ellas no recogen la mejor selección de proyectos posible, sino que la utilización de otras técnicas, como los modelos de scoring o los de optimización, ha proporcionado mejores resultados en este campo.

Los principales inconvenientes que presentan estas técnicas son:

- No consideran el problema al completo, ya que estas técnicas no tienen en cuenta todos los factores o características que afectan a la posible puesta en marcha de los proyectos seleccionados; es decir, no analizan factores como multiplicidad de recursos, restricciones, etc.

- Consideran únicamente un objetivo, el rendimiento económico, ignorando aquellos aspectos que son difícilmente cuantificables (aspectos cualitativos), mientras que en los problemas de selección de proyectos han de tenerse en cuenta una gran cantidad de criterios.

- Requieren una información que no está siempre disponible ni es fácil de medir antes de realizar el proyecto. Cuando no se disponga de esta información, esta debe ser estimada, con la dificultad y posible falta de exactitud que ello implica.

- Otra de las críticas más usuales a estas técnicas hace referencia a la tasa de descuento aplicada. Es de gran importancia la tasa utilizada y si debe o no utilizarse la misma tasa para todos los periodos de tiempo. La tasa utilizada tradicionalmente ha sido la tasa de mercado; sin embargo, esto ha recibido algunas críticas, alegando que la tasa de mercado sería la adecuada si el mercado fuese perfecto, pero ello no ocurre, por lo que autores como Graves y Ringuest (2003) establecen que, para que el *VAN* de cada proyecto sea adecuado, esa tasa de descuento debe estar ajustada al nivel de riesgo esperado o aceptado por los decisores.

Aunque las técnicas económicas fueron las primeras en aparecer, con los años han ido surgiendo estudios de selección de proyectos que emplean otras técnicas, como son los *árboles de decisión*, *scoring*, etc.

A_2) Modelos de Teoría de la Decisión: tablas y árboles de decisión

Estos modelos estudian el problema de la selección de una alternativa o proyecto candidato mediante la asignación de probabilidades de ocurrencia a cada uno de los posibles factores (estados) que pueden afectar a la decisión, por lo que para evaluar cada proyecto candidato esta selección se apoyará en principios de la Teoría de la Probabilidad. Así, para tomar una decisión, se modeliza la posible ocurrencia de cada suceso mediante una distribución de probabilidad que se actualiza mediante el Teorema de Bayes. Las preferencias del decisor sobre las consecuencias y sus actitudes frente al riesgo se modelizan mediante una función de utilidad $u(p,\theta)$, que indica la utilidad obtenida cuando se toma la alternativa o proyecto candidato *p* y se da el estado

θ. A partir de esta función y de las probabilidades de ocurrencia asignadas a cada estado, seleccionaremos la alternativa que proporcione una máxima utilidad esperada.

Dentro de los modelos de Teoría de la Decisión, existen dos modelos gráficos que son las dos formas más clásicas de estructurar y evaluar problemas de decisión. Estos son las *tablas de decisión* (también denominadas *matrices de estrategias*) y los *árboles de decisión*.

En ambos casos se pretende seleccionar una alternativa o proyecto candidato, de entre un conjunto de ellos, basándose en un problema en el que se puedan tener diferentes metas, múltiples objetivos y un entorno cambiante por las decisiones ya tomadas (proceso secuencial), en las que puede existir incertidumbre en muchos de sus aspectos. Esta incertidumbre obliga a tomar decisiones sin conocer con seguridad el efecto de factores externos no controlados (que es lo que llamaremos *estados*) y que van a influir en el resultado.

Tanto las tablas como los árboles de decisión parten de la idea de que las consecuencias de elegir una decisión no dependen solo de esta, sino también de los posibles estados. De manera que si el decisor conociese con exactitud el verdadero estado podría predecir la consecuencia de su elección con certeza: $\textit{decisión}\ (\mathrm{p}) + \textit{estado}(\theta) \rightarrow \textit{consecuencia}\ [\mathrm{c}(\mathrm{p},\theta)]$.

Así, en el caso discreto de *I* proyectos candidatos (p_1, p_2, …, p_I) y *m* estados posibles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, ..., \theta_m)$, el decisor debe asignar una utilidad a cada una de las alternativas en cada posible estado $u(p_i, \theta_j)$, es decir, la utilidad que se obtiene cuando se toma la alternativa p_i y se presenta el estado θ_j. Estas utilidades, junto con las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los posibles estados o sucesos, serán las que nos ayudarán a decidir qué proyecto/s seleccionar.

$A_{2.1}$) Tablas de decisión

Para el caso de las tablas de decisión, en cada una de las filas representamos los *I* proyectos candidatos $(p_1, p_2, ..., p_I)$, en las columnas los *m* estados posibles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, ..., \theta_m)$ y las utilidades $u(p_i, \theta_j)$ asignadas, por los decisores, a cada uno de los proyectos candidatos en cada posible estado en las celdas internas de la tabla de decisión (Tabla 1).

Tabla 1. Tabla de decisión genérica.

	θ_1	θ_2	$\cdots$	θ_m
p_1	$u(p_1, \theta_1)$	$u(p_1, \theta_2)$	$\cdots$	$u(p_1, \theta_m)$
p_2	$u(p_2, \theta_1)$	$u(p_2, \theta_2)$	$\cdots$	$u(p_2, \theta_m)$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\cdots$	$\vdots$
p_I	$u(p_I, \theta_1)$	$u(p_I, \theta_2)$	$\cdots$	$u(p_I, \theta_m)$

Una vez reflejado el problema en la tabla, tendremos que evaluar cada una de las alternativas, para lo que debemos, en primer lugar, asignar una probabilidad de ocurrencia a cada uno de los estados posibles b_j y, en un segundo lugar, calcularemos la utilidad esperada de cada una de las alternativas p_i mediante la siguiente expresión: $\sum_{j=1}^{m} b_j u(p_i, \theta_j) = E\left[u(p_i)\right]$.
Seleccionaremos aquellas alternativas (en orden) que presenten la máxima utilidad esperada.

Para clarificar el funcionamiento tanto de las tablas, como de los árboles de decisión resolveremos un ejemplo numérico (Supuesto 2) procedente de Ríos *et al.* (2002, p. 175)[1].

Supuesto 2. Una compañía de software está pensando en ampliar la gama de productos que vende en el mercado. Actualmente ofrece programas de gestión a otras empresas, pero quiere expandir su negocio hacia el mundo del ocio y entretenimiento… Sin embargo, poner en marcha esta idea le costará muy caro… Ante ello, se plantea tres proyectos candidatos:

p_1: poner en marcha el proyecto contratando nuevo personal especializado.

p_2: poner en marcha el proyecto a menor coste, formando al personal actual.

p_3: no poner en marcha el proyecto.

El agente decisor conoce que los beneficios dependen de si el precio de este tipo de software se incrementa respecto al actual, y estima que la probabilidad de que ocurra este incremento de precios (θ_1) es de 0.5, de que se mantenga (θ_2) es 0.3, y de que disminuya (θ_3) 0.2. Las utilidades establecidas por el decisor a cada conjunto de alternativa y suceso $\left(p_i, \theta_j\right)$ aparecen reflejadas en la Tabla 2.

En la tabla se observa que programa de contratación de nuevo personal proporciona mayores utilidades si los precios son buenos, pero reporta grandes pérdidas si los precios bajan, debido a los gastos no rentabilizados.

Tabla 2. Utilidades para el Supuesto 2.

	θ_1	θ_2	θ_3
p_1	$u(p_1, \theta_1)$ = 90	$u(p_1, \theta_2)$ = 30	$u(p_1, \theta_3)$ = -50
p_2	$u(p_2, \theta_1)$ = 50	$u(p_2, \theta_2)$ = 10	$u(p_2, \theta_3)$ = -20
p_3	$u(p_3, \theta_1)$ = 0	$u(p_3, \theta_2)$ = 0	$u(p_3, \theta_3) = 0$

Para seleccionar la o las alternativas, en primer lugar, calculamos la *utilidad esperada* para cada una de las alternativas (proyectos p_i). Estas serán las siguientes:

[1] Las diferencias existentes entre las técnicas que analizamos en el estudio, especialmente por el requerimiento de información, ha hecho que no sea posible utilizar un mismo ejemplo para resolver todas.

$$Eu(p_1) = 90\times 0.5 + 30\times 0.3 - 50\times 0.2 = 44$$
$$Eu(p_2) = 50\times 0.5 + 10\times 0.3 - 20\times 0.2 = 24$$
$$Eu(p_1) = 0$$

Con esta información, la opción óptima es seleccionar el proyecto p_1, poner en marcha el proyecto contratando nuevo personal especializado, ya que presenta la mayor utilidad esperada.

Aunque las tablas de decisión constituyen la forma más básica de representación de un problema de decisión, estas tienen dos grandes inconvenientes. Por un lado, presentan gran dificultad para representar alternativas en las que existe más de un momento de elección, esto es, problemas dinámicos. Por otro lado, gráficamente es más intuitiva la representación gráfica de un árbol de decisión. Estos aspectos han llevado a que en los problemas de selección de proyectos o carteras de proyectos, tradicionalmente, se han utilizado como herramientas árboles de decisión más que tablas de decisión, aunque ambos métodos son herramientas matemáticamente equivalentes.

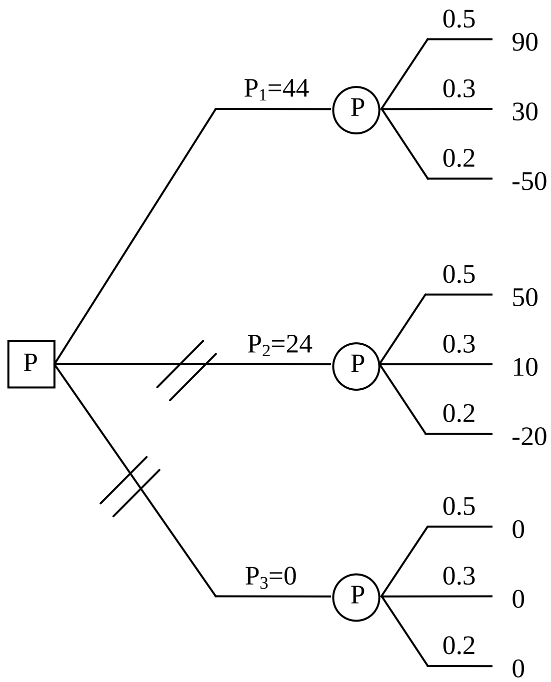
$A_{2.2}$) Árboles de decisión

Esta técnica parte de la teoría de la decisión establecida por Savage (1954). Este modelo es usado en situaciones en las cuales el decisor, para llegar a seleccionar un proyecto, debe llevar a cabo una secuencia de decisiones y entre cada dos decisiones sucesivas tiene lugar un resultado de la decisión anterior; es decir, cada decisión depende (normalmente) de un conjunto de decisiones anteriores, cada una de ellas con distintos estados con diferentes probabilidades de ocurrencia. Se evalúa así cada una de las ramas del árbol (opciones posibles) en función de la probabilidad de cada estado θ_j. Para su resolución aplicando el Principio de Máxima Utilidad Esperada, determinamos la mejor de las alternativas posibles, sabiendo que, en todo momento, el cálculo se realiza siempre de atrás hacia delante, es decir desde las hojas del árbol hacia la raíz. Un árbol de decisión se caracteriza por presentar una estructura ramificada (ver Figura 1) con tres tipos de nodos:

- *de decisión*, nodos rectangulares, del que emergen ramas que representan las decisiones posibles que se pueden tomar en ese instante;
- *de azar*, nodos circulares, cuyas ramas representan los estados posibles que se pueden dar en ese instante (en cada nodo de azar, las probabilidades deben sumar 1);
- *de valor*, terminales, que representan la utilidad de las consecuencias asociadas a la sucesión de decisiones y estados desde la raíz hasta ese nodo.

En un árbol de decisión, el decisor puede escoger qué rama de un nodo rectangular seguir, pero no qué rama de un nodo de azar, pues estarán determinados por circunstancias que se encuentran fuera de su control.

Figura 1. Árbol de decisión resuelto con los datos del Supuesto 2.



El cálculo de un árbol de decisión se realiza de atrás hacia delante, desde la hoja hasta la raíz, en el orden inverso al que los sucesos y decisiones realmente ocurren. Las últimas decisiones se analizan primero porque determinan las consecuencias de decisiones anteriores. De esta manera, partiendo de los nodos terminales iremos regresando hasta la raíz, seleccionando la máxima utilidad esperada. En el caso del Supuesto 2, anteriormente descrito, el decisor seleccionará el p_1, y en caso de que exista presupuesto suficiente irán eligiendo en orden el primero, segundo y último proyecto, esto es, $p_1(44) \rightarrow p_2(24) \rightarrow p_3(0)$.

Así, hemos presentado mediante la Figura 1 el caso más sencillo que puede darse en la toma de decisiones: un árbol simétrico, en el que existe un único periodo temporal y en el que una decisión no depende de ninguna anterior. Para el caso en el que una decisión dependa de otras anteriores, la estructura del árbol se incrementa, incorporando a alguna/s ramas anteriores otra/s sucesivas a partir de algunos de los nodos del árbol, complicándose enormemente el proceso de cálculo y evaluación de cada una de las alternativas. Para observar el funcionamiento de este tipo de problemas, puede verse el ejemplo resuelto en Ríos *et al.* (2002, pp. 180-181).

Ejemplos de esta técnica aplicados al campo de la selección de proyectos los encontramos en los trabajos de Gear y Lockett (1973), Gear (1974), Howard y Metheson (1984), Hess (1993) y Martino (1995), que incluyen en dichos trabajos ejemplos sencillos de selección de proyectos similares a los analizados en el Supuesto 2. Trabajos algo posteriores que presentan modelos más complejos de selección de proyectos utilizando árboles de decisión son los mostrados por Heidenberger (1996) y Gustafsson y Salo (2005).

Podemos decir que la principal ventaja de esta técnica es que nos encontramos frente a una herramienta muy gráfica de fácil uso, en la que se representan gráficamente todas las posibles alternativas de un problema de manera longitudinal, considerando las diferentes posibilidades de ocurrencia de cada una de las alternativas. Este sencillo modo de actuar, que aparece como una importante ventaja de la técnica cuando en el proceso de selección existen pocos proyectos candidatos, se convierte en una importante debilidad cuando nos enfrentamos a un problema de selección de gran tamaño, ya que su resolución requiere gran cantidad de tiempo, al analizar cada una de las alternativas con todas sus posibles probabilidades de ocurrencia.

Otras de sus debilidades son: la dificultad de la valoración del riesgo de cada uno de los sucesos, ya que la ocurrencia de cada uno de los proyectos depende, en parte, de la ocurrencia o no de algún otro de los sucesos. Además, es difícil calcular las estimaciones de probabilidades relacionadas con variables y preferencias, ya que estas son muchas veces consecuencia de resultados inciertos. Otro posible inconveniente lo encontramos en que la propia estructura del árbol es incapaz de mostrar las relaciones de dependencia que pueden existir entre las alternativas, hecho este de gran importancia para la selección de carteras de proyectos.

Hasta ahora hemos tratado los modelos de contribución al beneficio y los modelos de teoría de la decisión como métodos utilizados en un primer momento para seleccionar una o varias alternativas entre un conjunto de proyectos candidatos. El motivo del pronto desarrollo de estos métodos fue que se trataba de modelos sencillos y que permiten evaluar en cierta medida las diferentes alternativas. Sin embargo, ambos tipos de modelos encuentran una importante crítica, al presentar un exceso de dependencia hacia los aspectos económicos del problema. Esto implica que solo estudian valoraciones parciales del mismo, sin considerar todos o la mayoría de los aspectos que puedan afectar a la selección de proyectos. Este último factor condujo, en los años setenta-ochenta del siglo XX, a que las organizaciones comenzaran a presentar, para seleccionar proyectos, modelos alternativos que no tuviesen una formulación muy complicada, pero que incorporasen aspectos no cuantificables económicamente. Todo ello dio lugar al desarrollo del tercer tipo de métodos existentes dentro del primer bloque de técnicas de medidas de “beneficio”: los *métodos basados en pesos* y *ranking*.

A_3) Métodos basados en pesos y ordenación (ranking)

Estos modelos permiten determinar una jerarquía u orden (*ranking*) de preferencia de los proyectos candidatos, basándose en un conjunto de criterios, para que, posteriormente, el agente decisor, en función de los recursos disponibles, seleccione los proyectos en orden, hasta agotar los recursos. Para establecer un ranking entre proyectos, estas técnicas evalúan cada uno de los proyectos en función de los criterios que deben tenerse en cuenta en el proceso de decisión. Los modelos más usuales son: *métodos comparativos* ($A_{3.1}$) y *scoring* ($A_{3.2}$).

$A_{3.1}$) Modelos comparativos

En estos métodos cada proyecto se compara o con otro proyecto o con otro grupo de proyectos alternativos. Dentro de estos modelos, los más utilizados son: *conteo de la dominancia* y el *método de escala anclada*.

$A_{3.1.1}$) Conteo de la dominancia

Esta técnica permite jerarquizar proyectos en función del orden de dominancia de cada proyecto con respecto al resto de los proyectos para todos los criterios, considerando todos los criterios en conjunto. Así, en primer lugar, se localizará el proyecto más dominante para todos los aspectos; en segundo lugar, el segundo en orden de dominancia; y así sucesivamente.

Para presentar con más claridad dicho método, mostramos un ejemplo numérico en el Supuesto 3, procedente de Martino (1995 p.8). En este ejemplo se considera que existen 5 proyectos candidatos, $P = \{ p_A, p_B, p_C, p_D, p_E \}$, y las comparaciones por pares se encuentran representadas en la Tabla 3. En este caso, un 1 en alguna de las celdas de la tabla implica que ese proyecto, para todos los criterios, es mejor o igual en su comparación con otro proyecto. De manera que si, por ejemplo, conocemos que el proyecto p_B, en conjunto, domina o es preferido a p_A pondremos un 1 en la celda a_{21}; como el que un proyecto domine a otro implica que este segundo, p_A, es dominado por el primero, p_B, pondremos un 0 en la celda a_{12}. Se puede observar que el proyecto p_C domina al resto de los proyectos y, por tanto, es el que obtiene una mejor puntuación. El orden de preferencia conseguido por los proyectos es el siguiente:

$$p_C \to p_B \to p_A \to p_D \to p_E .$$

Tabla 3. Matriz de dominancia con los datos del Supuesto 4.

Proyectos	p_A	p_B	p_C	p_D	p_E	**Total**
p_A	1	**0**	0	1	1	**3**
p_B	**1**	1	0	1	1	**4**
p_C	**1**	**1**	**1**	**1**	**1**	**5**
p_D	0	0	0	1	1	**2**
p_E	0	0	0	0	1	**1**

La principal ventaja de esta técnica se encuentra en que es muy sencilla, ya que consiste en la simple evaluación global en función de todos los criterios considerados de cada uno de los proyectos, con el resto de proyectos realizando una comparación dos a dos.

Como inconveniente encontramos que, a pesar de su simplicidad inicial, este procedimiento se vuelve más complejo a medida que aumenta el número de proyectos a analizar y el número de criterios, ya que además de consumir una gran cantidad de tiempo en su cálculo presenta problemas a la hora de ordenar proyectos que tengan el mismo valor, es decir, estén dominados por el mismo número de proyectos. En este caso, se encontrarían en la misma posición y habría que aplicar otra técnica que diferencie entre ellos para su clasificación. Así, en el ejemplo considerado, se ha supuesto que existe certeza sobre la superioridad de un proyecto respecto a otro en cada uno de los criterios, pero ello no ocurre normalmente, pudiendo encontrarnos con proyectos no comparables en algún criterio o algunos criterios.

$A_{3.1.2}$) *Método de escala anclada* (*anchored scale*)

Para establecer un orden entre los proyectos, en esta técnica lo primero que se hace es seleccionar, de manera subjetiva, tanto el mejor como el peor proyecto de entre todos los candidatos, asignándole al primero una puntuación de 100 y al segundo una puntuación de 0. En segundo lugar, se toma otro proyecto cualquiera y se compara con uno de los dos para todos los criterios. Así, si este último es la mitad de bueno que el mejor se le concede una puntuación de 50, si se considera un tercio de bueno se le dará un valor de 33 y así sucesivamente.

Para el caso del ejemplo de la Tabla 3, partimos de que el proyecto p_C presenta la máxima puntuación y, por tanto, se le concede el valor 100 y al peor proyecto, en este caso al proyecto p_E, un valor de 0. El proyecto p_B comparado con p_C solo es un 25% peor que él y, por tanto, se le dará una puntuación de 75 y al proyecto p_A de 50, por ser la mitad de bueno que p_C, y así sucesivamente, quedando el siguiente orden: $p_C > p_B > p_A > p_D > p_E.$

En este ejemplo, al existir solo 5 proyectos, es fácil establecer un orden entre ellos, concediéndoles una puntuación más o menos fiable. El gran problema de esta técnica se encuentra en que esta clasificación no está tan clara cuando nos encontramos con muchos proyectos, por ejemplo 50 proyectos, y siendo más difícil todavía cuando en esta comparación se tiene en cuenta un conjunto amplio de criterios.

Algunos ejemplos sencillos de esta técnica en el campo de la selección de proyectos podemos encontrarlos en Hall y Nauda (1990) y en Martino (1995).

Globalmente consideradas, podemos señalar como característica principal de las técnicas anteriormente descritas ($A_{3.1}$: métodos comparativos) que son fáciles de usar y de comprender, pero dependen en gran medida de comparaciones subjetivas tal y como podemos observar en los estudios de selección de proyectos realizados por Pessemier y Baker (1971), Easton (1973) y Ormala (1986). En definitiva, estos métodos presentan una serie de inconvenientes tales como:

- Al trabajar con evaluaciones subjetivas, la valoración de cada uno de los proyectos puede ser inestable, de manera que puedan, por un lado, cambiar en el tiempo y, por otro, que las evaluaciones realizadas por diferentes personas no sean comparables.
- Los cambios en un conjunto de proyectos alternativos podrían afectar al orden general de preferencias u ordenación de todos los proyectos, lo que llevaría a la necesidad de recalcular el orden entre los proyectos.
- La mayoría de estos métodos se hacen impracticables al considerar muchos criterios y/o muchos proyectos.

$A_{3.2}$) Modelos de scoring

Un modelo de scoring es una expresión algebraica que produce una puntuación para cada proyecto en consideración, teniendo en cuenta los *n* factores o criterios considerados más importantes por parte del/los decisor/es. Para obtener esa valoración, cada uno de estos criterios es ponderado en relación a su importancia relativa con respecto al resto de criterios.

Los modelos que generalmente se han utilizado para seleccionar proyectos, en este contexto, son de dos tipos: puramente aditivos (modelos en los que los criterios considerados van sumando) y puramente multiplicativos (modelos en los que los criterios van multiplicando), en los que los criterios pueden tener el mismo o diferente peso en función de la importancia relativa de cada uno. Esta aproximación permite la ordenación de los proyectos en función del mayor o menor valor resultante obtenido, por lo que es una técnica fácilmente aplicable a un problema en el que se desea seleccionar un subconjunto de proyectos de entre todos los candidatos. Donde se escogerán los proyectos de los primeros puestos de la ordenación hasta agotar el presupuesto.

Dentro de los modelos de scoring encontramos: *checklist*, *scoring tradicional*, *análisis de utilidad multiatributo* (MAUT) y *proceso analítico jerárquico* (Analitic AHP).

$A_{3.2.1}$) Checklist

Esta técnica evalúa cada proyecto en función de los *n* criterios seleccionados, concediendo a cada uno de ellos la misma importancia, de forma que si un proyecto no cumple un determinado requisito se le concede un valor 0 para este criterio y si lo cumple un valor 1. El valor asignado a cada proyecto será la suma del resultado obtenido, es decir, si $i = 1, 2, ..., I$ son los proyectos candidatos y $j = 1, 2, ..., n$ los criterios evaluados, la puntuación de cada proyecto M_i estará expresada por el siguiente sumatorio: $M_i = \sum_{j=1}^{n} s_{ij}$, donde s_{ij} es la puntuación que se le concede al proyecto p_i por el criterio a_j, siendo s_{ij}=1 si cumple el criterio j y 0 si no lo cumple. Este sistema de evaluación se caracteriza por ser muy sencillo, de manera que a los agentes solo se les preguntará para cada proyecto si cumple o no cada uno de los criterios, si el proyecto i cumple el criterio j entonces s_{ij} =1 y si ese proyecto no cumple ese criterio s_{ij}= 0.

Existen muchos trabajos en los que se han utilizado esta técnica para seleccionar proyectos; entre ellos, encontramos los de Liberatore y Titus (1983), Meredith y Mantel (1999), y Cleland e Ireland (2002). A continuación, presentamos el ejemplo numérico (Supuesto 4) presentado por Meredith y Mantel (1999, p. 147). En este problema, Meredith y Mantel determinan que seleccionarán aquel o aquellos proyectos que obtengan una mayor puntuación según los criterios establecidos en la Tabla 4. En esta tabla se recoge exclusivamente la valoración de un único proyecto en función de todos esos criterios. Este mismo análisis debería realizarse para cada uno de los proyectos candidatos y, con las puntuaciones obtenidas, podríamos comparar los proyectos y seleccionar los de mayor puntuación. En la tabla siguiente se observa que la puntuación o valoración concedida al proyecto analizado es de *13*. Esto mismo debería realizarse con el resto de proyectos candidatos.

Tabla 4. Evaluación de un proyecto mediante *checklist*.

Criterio	*Si*	*No*
Aumento de requerimiento de energía	*1*	*0*
Se espera un incremento en ingreso	*1*	*0*
Se espera un incremento (%) del tamaño de mercado potencial	*1*	*0*
Necesita nuevas instalaciones	*1*	*0*
Necesita nueva experiencia técnica	*0*	*1*
Pérdida de calidad del producto final	*1*	*0*
Necesita personal nuevo para llevar a cabo el proyecto	*0*	*1*
No necesita reorganizar la estructura de la empresa	*1*	*0*
Impacto en la seguridad laboral	*1*	*0*
Impacto en los estándares medioambientales	*1*	*0*
TIR después de ingresos superior a un 15%	*1*	*0*
Beneficio anual esperado superior a 250000$	*1*	*0*
Tiempo de recuperación de la inversión inferior a 3 años	*1*	*0*
Necesita un asesor externo	*0*	*1*
Consistencia con la línea de negocio de la organización	*0*	*1*
Impacto en la imagen de la empresa	*1*	*0*
Impacto en la imagen de la empresa de los clientes	*1*	*0*
Impacto en la imagen de la empresa de nuestra industria	*0*	*1*
Puntuación total	**13**	**5**

El gran inconveniente de esta técnica se encuentra en que si dos proyectos consiguen la misma puntuación no podremos discriminar entre ellos. Este exceso de simplicidad es lo que ha llevado a que su uso difícilmente permita seleccionar los proyectos más adecuados. Para intentar resolver este problema, surgen los modelos de *scoring tradicional*.

$A_{3.2.2}$) Modelos de scoring tradicional

El modelo de *scoring tradicional* fue presentado por primera vez por Moore y Baker (1969) y es al que tradicionalmente se hace referencia cuando se habla de un *modelo de scoring*. Tiene un funcionamiento similar al de la técnica anterior ,con la diferencia de que esta técnica permite conceder una ponderación distinta a cada criterio. Este modelo se calcula a través de una fórmula matemática o expresión algebraica que produce una puntuación o valoración para cada uno de los proyectos en consideración. Esta fórmula incorporará aquellos factores que se consideran más importantes para evaluar cada uno de los proyectos y cada uno de estos factores estará ponderado para reflejar su importancia relativa con respecto al resto de los factores.

La primera y más sencilla estructura de *scoring* consiste en la suma ponderada de cada uno de los valores de cada criterio para cada proyecto *i*: $M_i = \sum_{j=1}^{n} w_j s_{ij}$, siendo M_i la puntuación total que se concede al proyecto *i*, donde *i* representa a cada uno de los *I* proyectos candidatos a evaluar, w_j la ponderación de cada uno de los *n* criterios, y s_{ij} es la puntuación que se concede al proyecto p_i bajo el criterio *j*. Por ejemplo, para el caso de la Tabla 5, s_{12}=3.31 es la puntuación del primer proyecto respecto al criterio *coste proyecto*. Estas puntuaciones s_{ij} estarán normalizadas para que no existan problemas de escala.

Aunque esta es la estructura más sencilla, existen trabajos que obtienen la puntuación o *score* de manera más elaborada, combinando una agregación aditiva con otra multiplicativa, como es el caso del estudio de Henriksen y Traynor (1999).

Para presentar claramente el *scoring* daremos un ejemplo (Supuesto 5), con datos estandarizados obtenidos de Martino (1995, p. 13). En este ejemplo, partimos de 5 proyectos candidatos $P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\}$ y tres criterios: *Éxito* del proyecto, *Coste del Proyecto* y *Cuota de Mercado* a la que afecta el proyecto. La valoración normalizada de cada uno de los proyectos, aportada por los expertos para cada uno de los criterios, viene reflejada en la Tabla 5. Vamos a suponer que, tras una reunión de expertos, se ha decidido que las ponderaciones (importancia relativa) que se concede a cada criterio son $w = \{1,1,2\}$ y la expresión matemática que calcula la puntuación para cada proyecto, es la siguiente:

$$M_i = \left((\text{Éxito} + 2 \cdot \text{Cuota de Mercado}) \Big/ \text{Coste de Proyecto} \right),$$

donde en el numerador aparecen los factores del tipo “cuanto más mejor”, como *Éxito* y *Cuota de Mercado*, y en el denominador el coste de los proyectos, del tipo “cuanto menos mejor”.

Con la expresión anterior se ha obtenido una puntuación para cada uno de los proyectos, puntuaciones que nos permiten seleccionar los proyectos en orden hasta agotar el presupuesto. El orden sería: $(p_5 > p_3 > p_4 > p_2 > p_1)$, tal y como se observa en la Tabla 5 siguiente:

Tabla 5. Puntuación que se concede a cada uno de los proyectos del Supuesto 5.

p_i / a_i	***Éxito (a_1)***	***Coste proyecto (a_2)***	***Cuota de mercado (a_3)***	**Puntuación *M_i***
P_1	1.25	3.31	1.99	***1.58***
P_2	1.80	2.15	2.45	***3.12***
P_3	7.70	2.38	1.50	***4.49***
P_4	5.09	2.73	2.97	***4.04***
P_5	3.45	1.80	10.32	***13.38***

Esta técnica de selección de proyectos ha sido ampliamente utilizada. Buen ejemplo de ello lo constituyen los trabajos de Lucas y Moore (1976), Coldrick *et al.* (2002, 2005), Lawson *et al.* (2006), Apperson *et al.* (2005), etc.

Dentro de las ventajas de esta técnica, destacan:

- Es un método más completo que los anteriores, en el que se pueden tener en cuenta aspectos de muy diversa índole, ya sean cuantitativos o cualitativos, objetivos o subjetivos.
- Refleja de manera sencilla la importancia relativa de diferentes factores.
- Es de fácil resolución (ecuación matemática que puede ser calculada con una sencilla hoja de cálculo) y comprensible por parte de los directivos.

No obstante, en esta técnica encontramos dos inconvenientes, principalmente:

- Por un lado, no tiene en cuenta el problema en su totalidad. Por tanto, a pesar de que esté valorando cada proyecto con diferentes criterios, no considera las restricciones del problema (cantidad de recursos disponibles, presupuesto por periodo, etc.).
- Esta técnica debe utilizarse cuando los criterios sean mutuamente independientes; en otro caso, un efecto puede estar valorándose más de una vez.
- Esta técnica no permite incorporar la cuantificación de las sinergias entre proyectos.

$A_{3.2.3}$) Análisis de utilidad multiatributo

Este análisis no es más que un método *scoring axiomático* (Ríos *et al.* (2002) y Barba-Romero y Pomerol (1997)). Este modelo asume que, consciente o inconscientemente, cualquier decisor intenta maximizar su utilidad a la hora de seleccionar cualquier proyecto; es decir, seleccionará aquel proyecto que le reporte una mayor satisfacción, considerando todos los criterios que le afecten. Se considera, por tanto, una función de utilidad total multiatributo que, tradicionalmente, se calcula mediante la suma aditiva o multiplicativa de las utilidades parciales para cada uno de los criterios de las distintas alternativas, lo que lleva a presentar un valor para cada una de las alternativas consideradas y, por tanto, una ordenación completa de alternativas.

Este análisis sigue dos fases. En la primera fase se medirá la utilidad parcial de cada alternativa en relación a cada criterio. Esta medición se realizará preguntando al centro decisor la satisfacción que le reporta para cada alternativa para cada uno de los criterios. En la segunda etapa se realiza una agregación de las utilidades parciales para obtener la utilidad global de cada alternativa, obteniendo así un valor numérico para cada una de ellas. Si $A = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ son los *n* criterios a evaluar y $P = \{p_1, ..., p_I\}$ los *I* proyectos candidatos, la función de utilidad conjunta $U(p_i)$ para cada proyecto vendrá medida por la agregación de las utilidades individuales de ese proyecto para cada criterio, es decir, $U(p_i) = F(u_1(p_i), u_2(p_i), ..., u_n(p_i))$.

La función de utilidad conjunta tradicionalmente utilizada es la función de utilidad aditiva (suma de las utilidades individuales): $U(p_i) = \sum_{j=1}^{n} w_j u_j(p_i)$, donde w_j es peso otorgado al atributo a_j y $u_j(p_i)$ es la utilidad que le reporta el valor del atributo *j* para el proyecto p_i.

Para expresar con mayor claridad el funcionamiento de esta técnica, presentaremos un ejemplo (Supuesto 6) procedente de los datos de Paralera (2005, p. 95). En este ejemplo, el centro decisor pretende establecer incineradoras de materiales específicos de riesgo (MER) en aquellas localizaciones que le reporten una mayor utilidad. Los proyectos candidatos son las distintas localizaciones en las que se pueden establecer una incineradora: *P*={*Aznalcóllar, Antequera, Alcalá la Real, Olvera, Alquife, Osuna*}, en función de los siguientes cinco criterios para llevar a cabo cada uno de los proyectos, {*costes fijos, costes de transporte, rechazo social, riesgo máximo, desutilidad colectiva*}. La matriz de datos presentada en ese estudio es la siguiente:

Tabla 6. Valoración de los proyectos en función de los criterios (Supuesto 6).

p_i / a_j	***Ctes fijos (a_1)***	***Ctes transp. (a_2)***	***Rechazo social (a_3)***	***Riesgo máx (a_4)***	***Desutilidad colectiva (a_5)***
Aznalcóllar (p_1)	7320.02	41067.68	9893480.00	1202080.00	6511.66
Antequera (p_2)	8283.18	31127.00	4389160.00	1246832. 00	41066.40
Alcalá Real (p_3)	7897.92	34421.60	7718920.00	1577730.00	24929.30
Olvera (p_4)	7705.28	33252-40	7429680.00	1826600.00	11381.10
Alquife (p_5)	7011.80	45744.20	5974620.00	1246832.00	2350.90
Osuna (p_6)	7375.03	29813.20	14705760.00	2443060.00	17529.30

Para el cálculo de la utilidad total de cada uno de los proyectos, lo primero que debemos fijar es la ponderación que se concede a cada uno de los criterios; en este caso se ha considerado que todos poseen la misma importancia, es decir, $w_j = 0.2, \forall_j$. En segundo lugar, tendremos que convertir los datos en unidades de utilidad para el decisor. Para ello, lo que haremos es asignar a cada dato un valor distinto del intervalo [0,10]. En el caso que nos ocupa, todos los criterios presentados son del tipo “cuanto menos mejor”, por lo que será preferible aquella alternativa que presente menores valores para cada uno de los criterios. Por tanto, estableceremos los valores extremos de las funciones de utilidad, asignándole un 0 ó un 1. Así, por ejemplo, para el caso de *costes fijos* el mayor coste es el de Antequera (8283.18€), por lo que asignaremos el valor 0 a 8500 y, como el mejor valor de coste es el de Alquife (7011.80€), le concederemos un valor de 10 a 7000€ y con esta asignación aproximada normalizamos todos los valores. En la siguiente tabla se muestran estos valores extremos para cada uno de los criterios.

Tabla 7. Valores extremos de cada uno de los criterios.

p_i / a_j	*Costes fijos* (a_1)	*Costes transporte* (a_2)	*Rechazo social* (a_3)	*Riesgo máximo* (a_4)	*Desutilidad colectiva* (a_5)
Aznalcóllar (p_1)	7320.02	41067.68	9893480.00	1202080.00	6511.66
Antequera (p_2)	8283.18	31127.00	4389160.00	1246832.00	41066.40
Alcalá Real (p_3)	7897.92	34421.60	7718920.00	1577730.00	24929.30
Olvera (p_4)	7705.28	33252.40	7429680.00	1826600.00	11381.10
Alquife (p_5)	7011.80	45744.20	5974620.00	1246832.00	2350.90
Osuna (p_6)	7375.03	29813.20	14705760.00	2443060.00	17529.30
Valor 0	**8500.00**	**46000.00**	**10000000.00**	**2600000.00**	**42000.00**
Valor 10	**7000.00**	**28000.00**	**4000000.00**	**1200000.00**	**2000.00**

Con esa información se han calculado las utilidades parciales y total para cada alternativa.

Tabla 8. Utilidades parciales y totales.

p_i / a_j	*C.fijos* $u_1(p_i)$	*C.trans* $u_2(p_i)$	*Rechazo social* $u_3(p_i)$	*Riesgo máx.* $u_4(p_i)$	*Desut.colectiva* $u_5(p_i)$	**Utilidad total** $U(p_i)$
P_1	7.87	2.74	5.09	9.99	8.87	**6.91**
P_2	1.45	8.26	9.68	9.67	0.23	**5.86**
P_3	4.01	6.43	6.90	7.30	4.27	**5.78**
P_4	5.30	7.08	7.14	5.52	7.65	**6.54**
P_5	9.92	0.14	8.35	9.67	9.91	**7.60**
P_6	7.50	8.99	1.08	1.12	6.12	**4.96**
Pesos (w_j)	**0.20**	**0.20**	**0.20**	**0.20**	**0.20**	

A partir de aquí, el orden para la realización de los proyectos sería el siguiente:

Alquife(p_5)>*Aznalcóllar*(p_1)>*Olvera*(p_4)>*Antequera*(p_2)>*Alcalá Real*(p_3)>*Osuna*(p_6)

En las últimas décadas, muchos autores han utilizado esta metodología para seleccionar proyectos, como es el caso de Keeney y Raiffa (1976). Algunos de los últimos estudios de la materia publicados son, por ejemplo, los de Fernández y Navarro (2005) y Duarte y Reis (2006).

La principal ventaja de este método frente a los anteriores es que este considera la satisfacción global de cada proyecto candidato en función de las utilidades o satisfacciones que le reporte al centro decisor, midiéndolos de manera muy exhaustiva para cada uno de los criterios.

El principal inconveniente es que se deben contrastar que se verifican las hipótesis básicas subyacentes en este enfoque (Barba-Romero y Pomerol (1997) y Ríos *et al.* (2002)). Además, solo resulta operativo en contextos decisionales con pocas alternativas y cuando sea posible una fuerte interacción con el centro decisor (Romero, 1993).

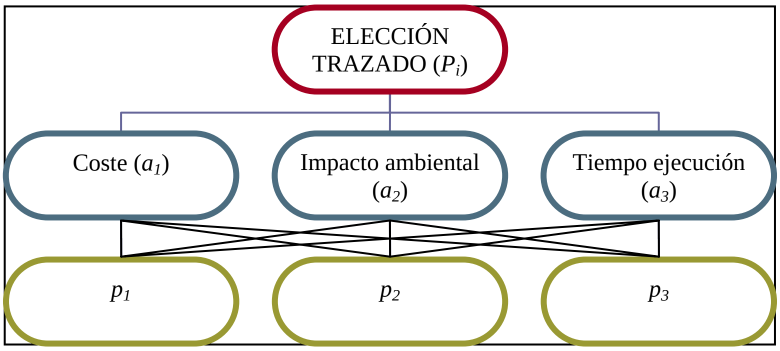
$A_{3.2.4}$) Modelo de Análisis Jerárquico (*AHP*)

Este modelo, desarrollado por Saaty (1980), ayuda a comparar un conjunto de alternativas en el que se pueden considerar aspectos tangibles e intangibles, basándose en tres principios fundamentales: descomposición, juicios comparativos y síntesis de prioridades. Esta técnica se puede aplicar para ordenar proyectos cuando los criterios pueden ser descompuestos jerárquicamente y, además, no necesita información cuantitativa acerca del valor que alcanza cada alternativa bajo cada uno de los criterios, sino tan solo los juicios de valor del decisor.

Para establecer un orden entre proyectos, esta técnica estructura el problema de forma piramidal, de manera que todos los proyectos quedan en la parte baja de la pirámide, en los niveles intermedios se encuentran los subcriterios y criterios y en la parte alta de la estructura los objetivos principales del análisis. Dentro de cada nivel, se realizan comparaciones por pares con respecto al ítem inmediatamente superior en la jerarquía, dando lugar a la obtención de pesos locales que actúan en el nivel de la jerarquía considerado. Estos pesos locales se combinan usando un modelo de valor aditivo para producir un conjunto de pesos globales o prioridades de las alternativas. De esta manera, cada una de las alternativas será ordenada (jerarquizada) por medio de los pesos globales calculados mediante esta técnica. Para llegar a este punto, esta metodología presenta tres pasos claramente definidos en el artículo de Cho y Kwon (2004). El primer paso consiste en estructurar la jerarquía para presentar los elementos básicos del problema, definiendo cuáles son los objetivos, criterios y alternativas del problema en cuestión. En el segundo paso se desarrolla una matriz que permita la comparación por pares de cada uno de los elementos; en un primer lugar entre cada uno de los elementos de cada nivel (creando los pesos locales) y, posteriormente, con los de su nivel inmediatamente superior. Y el tercer paso consiste en resumir (o sintetizar) la información estableciendo las prioridades desde el segundo nivel hacia abajo y, posteriormente, multiplicando las prioridades locales por las prioridades de cada criterio del nivel superior, se obtiene una puntuación global para cada una de las alternativas que nos permitirá su ordenación.

A continuación, presentamos un ejemplo numérico (Supuesto 7) extraído de Romero (1993, p. 143), que clarifica el funcionamiento de esta técnica. En este caso, una Administración Local pretende elegir el trazado de un nuevo tramo de autopista. Este organismo se encuentra con tres alternativas de trazado que conforman los tres posibles proyectos a ejecutar $P_i = \{p_1,\ p_2,\ p_3\}$, y para valorarlos se consideran tres criterios: *coste de ejecución*, *impacto ambiental* y *tiempo de ejecución*}. La estructura jerárquica del problema se representa de la siguiente manera:

Figura 2. Estructura piramidal para elegir el trazado adecuado.



Este método requiere una fuerte interacción con el centro decisor para expresar sus preferencias o juicios de valor. El decisor lo primero que hace es establecer sus preferencias mediante la comparación por parejas. Así, en el segundo nivel jerárquico, pidiéndoles a los decisores que comparen los criterios (*coste*, *impacto ambiental* y *tiempo de ejecución*), por pares, con respecto al objetivo global (*elección trazado*) se obtiene la siguiente matriz:

Tabla 9. Matriz de comparación por parejas para el 2º nivel.

Criterios/Criterios	***Coste (a_1)***	***Impacto ambiental (a_2)***	***Tiempo ejecución (a_3)***	***Pesos (w)***
Coste (a_1)	1	2	5	**0.588**
Impacto ambiental (a_2)	1/2	1	3	**0.294**
Tiempo ejecución (a_3)	1/5	1/3	1	**0.118**

En esta tabla se observa, por un lado, la relación que existe entre criterios (columnas 2, 3 y 4 de la Tabla 9). Así, por ejemplo, se puede ver que el coste es 2 veces más importante que el criterio ambiental y 5 más que el tiempo de ejecución; y, por otra parte, que a partir de la relación que existe entre los criterios se puede obtener un sistema de pesos[2] (columna 5 de la Tabla 9) consistente con las preferencias subjetivas de los decisores que reflejan la importancia relativa de cada uno de los criterios.

Una vez determinados los pesos para el segundo nivel jerárquico, se realiza una nueva interacción con el centro decisor que tendrá que establecer su nivel de preferencias de cada alternativa en relación al resto de alternativas para cada uno de los criterios (*coste*, *impacto ambiental* y *tiempo de ejecución*), manifestando de este modo sus preferencias en cada una de las 3 siguientes matrices:

[2] Estos pueden ser obtenidos de muy diferentes formas; en este caso, y siguiendo la manera de resolución de Romero (1993), los pesos de las *Tablas 10*, *11*, *12*, *13* y *15* han sido calculados mediante un modelo de programación por metas ponderadas.

Tabla 10. Matriz de comparación por pares para el 3º nivel en relación al 1º criterio (coste).

	p_1 (x_1)	p_2 (x_2)	p_3 (x_3)	*Pesos w*
p_1 (x_1)	1	6	3	**0.667**
p_2 (x_2)	1/6	1	1/2	**0.111**
p_3 (x_3)	1/3	2	1	**0.222**

Tabla 11. Matriz de comparación por pares para el 3º nivel en relación a 2º criterio (impacto).

	p_1 (x_1)	p_2 (x_2)	p_3 (x_3)	*Pesos w*
p_1 (x_1)	1	1/9	1/5	**0.069**
p_2 (x_2)	9	1	2	**0.621**
p_3 (x_3)	5	½	1	**0.310**

Tabla 12. Matriz de comparación por pares para el 3º nivel en relación al 3º criterio (tiempo).

	p_1 (x_1)	p_2 (x_2)	p_3 (x_3)	*Pesos w*
p_1 (x_1)	1	½	1/4	**0.143**
p_2 (x_2)	2	1	1/2	**0.286**
p_3 (x_3)	4	2	1	**0.571**

Una vez calculados los pesos para los niveles 2 y 3, el método obtiene unos pesos globales con los que otorga una puntuación a cada alternativa.

Tabla 13. Matriz de pesos globales.

	Coste (a_1)	*Impacto ambiental* (a_2)	*Tiempo ejecución* (a_3)	*Pesos globales*
P_1 (x_1)	0.667	0.069	0.143	**0.429**
P_2 (x_2)	0.111	0.621	0.286	**0.282**
P_3 (x_3)	0.222	0.310	0.571	**0.289**

Estos pesos globales se obtienen por medio de una agregación multiplicativa entre niveles jerárquicos. Así, por ejemplo, la alternativa p_3 obtiene una puntuación de 0.289, que se calcula de la siguiente forma: $0.289 = 0.222 \times 0.588 + 0.310 \times 0.294 + 0.571 \times 0.118$. De la Tabla 13 se infiere que el trazado del tramo de autopista a realizar será el correspondiente al proyecto p_1.

Esta técnica presenta una serie de fortalezas, siendo la principal de ellas su habilidad para comparar y ordenar alternativas basándose tanto en factores cuantitativos como cualitativos, ya que esta técnica permite generar valores cuantitativos basándose en aspectos o juicios de valor cualitativos. Por otro lado, también encontramos que el hecho de que el proceso de toma de decisiones en el AHP se base en comparaciones por pares, ayuda al analista y decisor a tener más claro el proceso. Otra de sus ventajas se encuentra en que detecta y acepta, dentro de ciertos límites, la incoherencia de los decisores humanos. Estas características han hecho que dicha técnica haya sido ampliamente utilizada en una gran variedad de problemas y, en particular, en el campo de la selección de proyectos, donde podemos encontrar artículos como los de Lockett *et al.* (1986), Liberatore (1987) y Schniederjans y Wilson (1991), quienes presentan diferentes aplicaciones de esta técnica para seleccionar proyectos en el campo de la industria.

No obstante, también presenta una serie de inconvenientes:

- La ordenación final puede verse alterada por la introducción de nuevas alternativas, aunque estas no sean muy buenas.
- Además, si hay muchos subcriterios o alternativas, el número de comparaciones puede ser muy elevado y resultar una tarea tediosa para el decisor.
- El proceso de AHP asume la inexistencia de interdependencia entre proyectos, por lo tanto no permite la incorporación de interdependencias.
- No permite considerar el problema al completo, ya que no admite la incorporación de restricciones en el problema.

Considerados en conjunto todos los métodos de *scoring* desarrollados en este apartado, podemos decir que presentan una serie de ventajas como son:

- Permiten no solo la consideración de muchos criterios para evaluar cada uno de los proyectos, sino que además esos criterios ya no tendrán que considerar exclusivamente aspectos cuantitativos, como ocurría con los métodos de decisión basados en técnicas económicas, ya que también pueden trabajar con criterios cualitativos, al permitir la utilización de escalas ordinales.
- Presentan una estructura muy sencilla, por lo que son fáciles de usar y entender.
- Son fácilmente adaptables a los cambios del entorno o de las políticas directivas.
- Los modelos de *scoring tradicional* y de *utilidad multiatributo* permiten ponderar los criterios, es decir, permiten dar más importancia a unos criterios frente a otros.
- Estos modelos permiten que se realicen fácilmente análisis de sensibilidad.

A pesar de que estos modelos han alcanzado a lo largo de los años una gran popularidad, por su facilidad de uso a escala de organización de empresas, también presentan algunos inconvenientes como son:

- Los criterios deben ser independientes; esto es, las actividades y resultados de un proyecto no deben depender de las actividades y resultados de otro u otros proyectos.
- Requieren gran cantidad de información para evaluar cada proyecto; de hecho, estos modelos solo están justificados en problemas no muy complejos y con pocos criterios.
- El valor obtenido tras realizar una valoración mediante cualquiera de las técnicas de *scoring* no es más que una medida relativa; es decir, esta puntuación no implica directamente si el proyecto debe o no ser llevado a cabo.
- Estos modelos estudian el problema parcialmente, al analizarlo solo en función de los criterios considerados oportunos (coste, aspectos medioambientales, etc.), pero no tienen en cuenta el conjunto de restricciones y condiciones que afectan o pueden afectar al problema, tales como: cantidad de recursos disponibles, interdependencias entre proyectos, etc.

Hasta finales de la década de los ochenta del siglo XX las empresas se apoyaban en modelos que ayudaban a elegir aquellos proyectos que maximizaban el resultado[3] de la organización, seleccionando uno o varios proyectos en el orden de preferencia hasta agotar el presupuesto, pero manteniendo en común como principal crítica que *ninguno de ellos abordaba el problema en conjunto;* esto es, se analizaba el problema de manera parcial, ya sea considerando uno o varios criterios, pero sin determinar claramente el marco de cada problema mediante la introducción del conjunto de restricciones de cada uno de ellos (nivel de presupuesto, recursos disponibles, etc.).

Esta carencia, junto al hecho de que los decisores de las organizaciones comienzan a cambiar su filosofía y a plantearse como meta no simplemente seleccionar proyectos individualmente, sino seleccionar un grupo de proyectos con el objeto de aprovechar las sinergias existentes entre ellos y así realizar una selección más adecuada, lleva a la aparición y utilización de nuevos métodos en este campo.

Como conclusión de este apartado (*A*), podemos decir que las técnicas desarrolladas hasta este momento *seleccionan individualmente proyectos,* esto es, realizan una "selección de proyectos", mientras que las técnicas que desarrollaremos a continuación y que comienzan a expandir su uso en este campo a partir de mediados de los años 80 nos permitirán *seleccionar un conjunto de proyectos con alguna/s característica/s en común*, por lo que en las técnicas que analizaremos a partir de ahora hablaremos de una "selección de grupos o carteras de proyectos".

B) Otros métodos: cluster, DEA

En este bloque desarrollaremos dos técnicas que, sin ser exclusivas para los problemas de selección de proyectos, sí que se han utilizado para seleccionar un grupo de proyectos en bloque, pero no encajan del todo en los otros dos bloques considerados.

B_1) El análisis cluster

El *análisis cluster*, también denominado *análisis de conglomerados*, trata de agrupar los proyectos candidatos a partir de una serie de atributos independientes, de forma que los grupos (o conglomerados) sean lo más homogéneos posible en función de lo similar o distinto que sean los proyectos entre sí. Esta búsqueda de similaridad para el caso de la selección de grupos de proyectos generalmente se centra en la búsqueda de aquel grupo de proyectos que mantenga una posición estratégica en la empresa, tal y como establecen Mathieu y Gibson (1993).

---

[3] Entendiendo esta maximización del resultado como la maximización de: el beneficio, la satisfacción o utilidad de la organización.

La homogeneidad de los grupos se mide mediante la distancia existente entre proyectos, tratando simultáneamente de maximizar la distancia entre los grupos de ciertas características y de minimizar la distancia intragrupos. En la realización de un análisis cluster se suelen distinguir tres etapas:

1. Elección de los criterios o variables relevantes para discriminar la selección.
2. Elección de la medida de proximidad entre proyectos, para poder, teniendo en cuenta esta medida, calcular una matriz de semejanzas o distancias entre cada par de proyectos.
3. Una vez obtenidas la matriz de distancias entre los diferentes casos, agruparemos los proyectos en conglomerados. Aunque existen diferentes métodos para asignar cada uno de los proyectos a un determinado grupo, uno de los algoritmos más utilizados es la suma de las distancias euclídeas al cuadrado entre los elementos de un conglomerado *H* y su centroide[4]. Este método se basa en la asignación de cada uno de los proyectos a aquellos grupos cuyo centroide se encuentre más próximo.

$$Medida(H) = \sum_{r \in h} \sum_{j=1}^{n} (a_{rj} - \overline{a_j}(H))^2 \ ,$$

donde $r \in H$ denota el conjunto de elementos pertenecientes al grupo *H*, *n* el número de criterios, a_{rj} el valor del criterio *j* para cada uno de los proyectos del conjunto *H*, y $\overline{a_j}(H)$ la media de los valores de ese criterio *j* para los proyectos pertenecientes al conjunto *H*. El objetivo de este procedimiento es encontrar los *d* conglomerados que minimizan la suma de esa medida para cada uno de los *d* grupos solicitados (previamente determinados por el decisor), es decir, $Minimizar \sum_{h=1}^{d} Medida(H)$. Este proceso nos lleva a encontrar los *d* grupos de proyectos más similares.

Para observar cómo funciona este procedimiento, presentaremos un sencillo ejemplo, Supuesto 8, con datos procedentes de Martino (1995, p. 47[5]). Realizaremos un análisis cluster para ver si es posible encontrar algún grupo de proyectos que responda mejor a los objetivos perseguidos por la organización (mejores resultados de las variables seleccionadas). Para ello, evaluaremos cada uno de los 16 proyectos candidatos, $P_i = \{p_1, \ p_2, ..., \ p_{16}\}$, basándonos en los siguientes tres criterios {coste de ejecución de cada uno de los proyectos (a_1), nivel de ingresos (a_2), tamaño de mercado (a_3)}. Los datos están reflejados en la siguiente Tabla 14.

---

[4] Por el centroide de un grupo ha de entenderse el punto constituido por los valores medios de las variables independientes consideradas en el análisis para los individuos pertenecientes a ese grupo.

[5] La información de esa misma página 47 ha sido utilizada tanto para realizar el análisis cluster como para la programación monobjetivo, multiobjetivo y por metas. En todos estos casos se seleccionará una u otra/s variable/s en función de las necesidades de la técnica aplicar.

Tabla 14. Valoración de cada uno de los proyectos en función de cada criterio (Supuesto 8).

	Coste en 100$ (a_1)	***Ingreso en Mill.$ (a_2)***	***Tamaño de mercado en Mill.$ (a_3)***
P_1	48	47	430
P_2	38	41	340
P_3	40	18	180
P_4	43	38	290
P_5	35	342	1220
P_6	25	375	1340
P_7	26	122	610
P_8	41	152	1010
P_9	53	81	810
P_{10}	81	67	560
P_{11}	97	71	710
P_{12}	51	153	1180
P_{13}	89	74	460
P_{14}	78	29	180
P_{15}	97	62	270
P_{16}	90	90	430

Con estos datos, realizamos un análisis cluster tanto para diferentes grupos por ejemplo para *d=2,3,…* En este trabajo, por simplicidad, solo realizaremos el análisis para dos grupos de características similares; en caso de que se quieran analizar otros ejemplos, véase Carazo (2007). Una vez presentadas las agrupaciones y según el presupuesto disponible la organización seleccionaría aquel grupo de proyectos considerado mejor en función de los criterios utilizados.

Para el caso en el que se realicen dos únicos grupos:

- El primer grupo estaría compuesto por los 5 siguientes proyectos[6] $\{p_5, p_6, p_8, p_9, p_{12}\}$. En principio, este será el grupo elegido al aglutinar a los proyectos de menor coste (4,100$), mayor cantidad de ingresos (220,600,000$), y mayor tamaño de mercado (1,112,000,000$).
- En relación al segundo grupo, este estará formado por los 11 proyectos restantes. Estos se caracterizan por ser más costosos y por proporcionar tanto menores ingresos como menor tamaño de mercado, tal y como se observa en la Tabla 15.

Tabla 15. Centros de los conglomerados finales para 2 grupos.

	Conglomerado 1	Conglomerado 2
Coste en 100$ (a_1)	**41.0**	66.1
Ingreso en Mill. $ (a_2)	**220.6**	59.9
Tamaño de mercado en Mill. $ (a_3)	**1112.0**	405.0

Una vez realizada la agrupación en solo 2 conglomerados, se observa que se seleccionarían exclusivamente 5 proyectos de los 16 candidatos. Puede ocurrir que los directivos quisiesen profundizar en el estudio para ver si se observa algún patrón de comportamiento al agrupar en tres bloques, por lo en este caso realizarían un análisis para *d=3* y analizarían los resultados.

[6]La información referente a la pertenencia de cada proyecto a cada grupo viene recogida en una tabla de SPSS denominada “pertenencia a los conglomerados”.

Tal y como establece Martino (1995), esta técnica ha sido poco utilizada en el campo de selección de proyectos y cartera de proyectos. Los principales motivos pueden encontrarse en que realmente no se trata de una técnica que se ajuste fielmente a la filosofía de selección de proyectos, sino que simplemente ayuda a encontrar grupos de proyectos homogéneos o similares y, una vez analizados estos, es posible encontrar el mejor o los mejores grupos.

Como inconvenientes de esta técnica encontramos que, aunque permite distinguir grupos de proyectos similares teniendo en cuenta una serie de variables establecidas *a priori* por el centro decisor, no analiza el problema en su conjunto, ya que no permite incorporar restricciones específicas ni valores concretos, sino que solo selecciona aquel conjunto de proyectos que de media presentan los mejores valores en un conjunto de características estudiadas. Pero, por ejemplo, ¿qué ocurriría si no se dispone de presupuesto (o algún otro recurso) suficiente para financiar todos los proyectos del grupo? ¿Cuál eliminaríamos? En principio, serían los que se encuentren más alejados del centroide del grupo, pero como existen diferentes definiciones de distancia, los proyectos a descartar pueden ir variando. Otro inconveniente de esta técnica se encuentra en que puede proporcionar resultados poco fiables en caso de trabajar con muchas variables. Por tanto, esta técnica nos ayuda a seleccionar proyectos similares considerando las variables establecidas *a priori* por el centro decisor, que además no pueden ser demasiadas, pero no a seleccionar proyectos específicos dentro de los pertenecientes a un grupo.

Dentro de las fortalezas o ventajas que presenta esta herramienta encontramos, por un lado, que permite trabajar con muchos proyectos (*alternativas*) y con todo tipo de información, tanto datos cualitativos como cuantitativos. Por otro lado, esta técnica nos presenta grupos de proyectos de características similares, lo que en algunas ocasiones puede serle muy útil al agente decisor, especialmente para el caso en el que se pretenda seleccionar el grupo de proyectos que mantengan la dirección o estrategias de la organización.

Todo lo anterior, las fortalezas y las debilidades, ha llevado a que en la mayoría de los trabajos encontrados se utilice el análisis cluster como complemento de otra técnica. Un ejemplo de ello es el estudio presentado por Graves y Ringuest (2003), quienes utilizan esta técnica para eliminar un grupo de proyectos (el peor de los conglomerados) y, posteriormente, seleccionar del resto de proyectos la cartera de proyectos definitiva utilizando otra técnica de selección.

B_2) Análisis Envolvente de Datos (DEA)

Este análisis surge a raíz del trabajo de Charnes *et al.* (1978), quienes proponen medir la eficiencia técnica relativa de un conjunto de unidades similares (conocidas como *unidades de decisión*, DMU) mediante el uso de modelos de programación lineal. La evaluación de tales unidades se realiza a partir del consumo de un conjunto común de variables input (factores del tipo "cuanto menos mejor") para la obtención de un conjunto común de variables output (factores del tipo "cuanto más mejor"). Además, los inputs y outputs no necesitan tener las mismas unidades de medida, ni se necesita ninguna relación funcional que los vincule.

Supongamos que hay *I* unidades de decisión homogéneas a evaluar, en nuestro contexto son los proyectos, y cada uno de ellos viene caracterizado por el vector observado de inputs $Q_i = (q_{1i}, q_{2i}, q_{3i},\dots,q_{pi})$ y el vector de outputs $Y_i = (y_{1i}, y_{2i}, y_{3i},\dots,y_{si})$; es decir, todos los proyectos consumen *p* inputs en cantidades variables y generan *s* outputs, en cantidades variables.

El modelo inicial presentado y definido por las siglas de sus autores, CCR, representado abajo, calcula la eficiencia técnica de cada unidad de decisión DMU_i, ($i= 1, 2, 3,\dots, I$) a partir del ratio entre la suma ponderada de sus ouputs observados y la suma ponderada de sus inputs observados. Los pesos, u_r e v_k, son las variables a determinar, de forma que se haga máxima dicha ratio, sujeta a la condición de que las ratios similares para cada una de las unidades de decisión consideradas sea menor o igual que uno.

Figura 3. Modelo CCR.

$$\underset{u,v}{Max} \quad h_o = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r \cdot y_{ro}}{\sum_{k=1}^{p} v_k \cdot q_{ko}}$$

$$Sujeto \quad a$$

$$\frac{\sum_{r=1}^{s} u_r \cdot y_{ri}}{\sum_{k=1}^{p} v_k \cdot q_{ki}} \leq 1 \qquad i = 1, 2, \dots, \quad I$$

$$u_r, v_k \geq 0, \quad r = 1, 2, 3 \dots, \quad s \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad p$$

El problema arriba presentado debe realizarse *I* veces, es decir, una para cada uno de los proyectos que se evalúan, proporcionando la función objetivo el grado de eficiencia o ineficiencia para cada una de estos a partir de la comparación con el resto. Un proyecto p_i será eficiente si el ratio h_o es igual a uno y esto ocurrirá si existe un conjunto de ponderaciones que hacen que esa unidad (proyecto, en nuestro caso) represente las mejores prácticas en relación a su uso de inputs y ouputs y, por tanto, aparecen como referente para el resto. Si es inferior a *1*, implica que existe otra u otras unidades (otro u otros proyectos) que pueden producir más con el mismo nivel de recursos o, en su caso, pueden producir lo mismo con menos recursos.

Dado que el problema inicial es un problema fraccional de resolución complicada y que presenta infinitas soluciones, como posible solución se suele realizar un cambio de variables para convertirlo en un problema lineal, mediante alguno de los 2 posibles cambios de variables:

$$\mu_r = \frac{u_r}{\sum_{k=1}^{p} v_k \cdot q_{ki}} \quad y \quad w_k = \frac{v_k}{\sum_{k=1}^{p} v_k \cdot q_{ki}}, \qquad \mu_r = \frac{u_r}{\sum_{r=1}^{s} u_r \cdot y_{ri}} \quad y \quad w_k = \frac{v_k}{\sum_{r=1}^{s} u_r \cdot y_{ri}},$$

quedando de la siguiente manera en cualquiera de sus dos vertientes, ouputs e inputs:

Figura 4. Modelo CCR_M (inputs)

$$\begin{aligned} &\underset{\mu, w}{\text{Max}} \ \omega_o = \sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{ro} \\ &\text{sujeto a}: \\ &\sum_{k=1}^{p} w_k q_{ko} = 1 \\ &\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{ri} - \sum_{k=1}^{p} w_k q_{ki} \le 0 \\ &i = 1,2,3........., \ I \\ &\mu_r, w_k \ge 0 \\ &r = 1,2,3,......, \ s \\ &k = 1,2,3,......., \ p \end{aligned}$$

Figura 5. Modelo CCR_M (ouputs)

$$\begin{aligned} &\underset{\mu, w}{\text{Min}} \ t_o = \sum_{k=1}^{p} w_k q_{ko} \\ &\text{sujeto a}: \\ &\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{ro} = 1 \\ &-\sum_{r=1}^{s} \mu_r y_{ri} + \sum_{k=1}^{p} w_k q_{ki} \ge 0 \\ &i = 1,2,3........., \ I \\ &\mu_r, w_k \ge 0 \\ &r = 1,2,3,......, \ s \\ &k = 1,2,3,......., \ p \end{aligned}$$

Ambos planteamientos, en la *versión inputs* y *versión ouputs*, son equivalentes, con la diferencia de que en el modelo orientado a input se pretende obtener el mayor resultado posible (ouputs) con el nivel de recursos (inputs) existentes. Para el caso del orientado al ouput, se tiene como objetivo utilizar la menor cantidad de input para producir unos ouputs determinados.

Para expresar con claridad este análisis, mostraremos un ejemplo concreto, Supuesto 9, que consistirá en la selección del conjunto de proyectos técnicamente eficientes dentro del conjunto de candidatos. Para ello, se ha seleccionado una submuestra (los 15 primeros proyectos) del tutorial del programa EMS (Efficiency Measurement System), concretamente de la versión 1.3 (2000).

Supongamos se desea seleccionar, de entre un conjunto de 15 proyectos candidatos $P = \{ p_1, p_2, ..., p_{15} \}$, aquellos que sean eficientes técnicamente. Para ello se tendrán en cuenta 5 criterios, de los cuales los tres primeros serán inputs y los dos últimos ouputs {costes [*I*], plantilla[*I*], clientes [*I*], ingresos [*O*], satisfacción [*O*]}. La matriz de datos quedaría:

Tabla 16. Matriz de datos de los diferentes proyectos.

	Costes {I}	*Plantilla {I}*	*Clientes {I}*	*Ingresos {O}*	*Satisfacción {O}*
P_1	152.65	129.95	128.63	122.85	154.12
P_2	138.92	134.55	157.66	153.48	171.37
P_3	137.19	115.32	106.78	131.60	144.70
P_4	74.90	95.25	63.25	81.31	73.78
P_5	98.47	88.50	117.57	98.56	105.04
P_6	91.93	82.08	155.20	98.22	73.71
P_7	74.51	59.96	61.14	62.56	42.89
P_8	91.06	106.00	235.15	109.85	121.86
P_9	64.70	64.70	51.73	50.86	32.98
p_{10}	72.92	81.90	81.61	81.25	91.68
p_{11}	190.01	140.00	179.52	203.50	187.36
p_{12}	83.32	77.60	107.19	86.35	73.78
p_{13}	68.63	62.25	117.57	76.85	30.82
p_{14}	77.46	84.20	64.53	103.05	76.80
p_{15}	95.36	111.46	79.95	101.17	129.84

Una vez presentadas las características de los proyectos candidatos, debemos determinar el tipo de modelo a emplear. En este caso, utilizaremos un modelo BCC orientado al ouput, ya que lo que nos interesa es observar qué proyectos producen la mayor cantidad de ouputs con los inputs existentes con rendimientos a escala variable. Utilizando el programa EMS, el resultado que se desprende es que serán eficientes todos los proyectos salvo los proyectos p_1, p_6 y p_{12}, tal y como se observa en la Tabla 17. Tras realizar este análisis y con los resultados aportados por la Tabla 17, podríamos determinar qué es necesario para que estos proyectos fuesen técnicamente eficientes comparados con los demás, simplemente observando las unidades de referencia de los proyectos técnicamente ineficientes y en qué criterios deben mejorar.

Tabla 17. Eficiencia/Ineficiencia de proyectos.

			HOLGURA				
	Eficiencia	***Unidades de referencia***	***Costes***	***Plantilla***	***Clientes***	***Ingresos***	***Satisf.***
P_1	102.49%	11 (0.49);15 (0.51)	11.02	4.54	0	25.29	0
P_2	100.00%	0					
P_3	100.00%	0					
P_4	100.00%	0					
P_5	100.00%	1					
P_6	103.84%	7(0.30);11(0.15);13(0.14);14(0.41)	0	0	67.57	0	0
P_7	100.00%	2					
P_8	100.00%	0					
P_9	100.00%	0					
p_{10}	100.00%	1					
p_{11}	100.00%	2					
p_{12}	101.83%	5(0.33); 7(0.33);10(0.01);14(0.33)	0	0	26.11	0	0
p_{13}	100.00%	1					
p_{14}	100.00%	2					
p_{15}	100.00%	1					

Sobre la base del modelo inicial se han realizado multitud de estudios y modificaciones para aplicarlos a casos concretos a lo largo de los años. En el campo de la selección de cartera de proyectos encontramos una gran cantidad de estudios que utilizan el Análisis Envolvente de Datos (DEA) como herramienta de selección. Buena muestra de ellos son los trabajos de Cooper *et al.* (1999b), Linton *et al.* (2002), Chiou y Tzeng (2004), Cook (2004), Eilat *et al.* (2006), etc.

Como conclusión, podemos indicar que esta técnica tiene una serie de ventajas como son:

- Se ajusta perfectamente al campo de la selección de proyectos, donde cada una de las unidades de decisión serán los proyectos candidatos y en los que los inputs y ouputs considerados serán los diferentes criterios a tener en cuenta para seleccionar o no los proyectos. De esta manera, esta técnica, basada en un conjunto de criterios, determinará dos grupos de proyectos: los técnicamente eficientes y, por tanto, inicialmente financiables y los no eficientes, para los que la técnica nos presenta información suficiente para determinar en qué aspectos deben mejorarse estos proyectos comparados con los eficientes para pasar a ser eficientes.
- Se trata de una herramienta de decisión multicriterio que no necesita que las variables consideradas se presenten en la misma escala de medida, hecho este que normalmente ocurre en el campo de la toma de decisión, donde generalmente nos enfrentamos a criterios de muy diferentes características y unidades de medida. Esta herramienta permite trabajar tanto con criterios de muy diferente escala de medida, como con criterios muy heterogéneos e, incluso, con datos cualitativos e imprecisos (IDEA).
- No necesitamos una ponderación *a priori* de los criterios seleccionados, sino que el propio modelo nos muestra las ponderaciones que deben tomar cada uno de los criterios para presentar esas unidades eficientes (proyectos). Este aspecto es fundamental en el campo de la selección de proyectos, en el que existe un alto grado de incertidumbre en relación a la importancia relativa de cada uno de los criterios considerados.

Con respecto a sus inconvenientes, aparece como principal debilidad que nos enfrentamos a un análisis que, aunque refleja cuáles son los proyectos técnicamente eficientes, no nos indica ninguna medida para discriminar dentro del grupo de los proyectos técnicamente eficientes, de manera que si no tuviésemos presupuesto suficiente para financiar a todos los eficientes no podríamos establecer un orden, lo que convierte a esta técnica en adecuada para ser complementada por otra. Esta técnica, al igual que ocurría con el análisis cluster, puede ser utilizada para realizar una clasificación inicial (filtro), presentando dos grupos de proyectos (eficientes *versus* ineficientes), eliminando del estudio aquellos proyectos que, considerando estos criterios, no son técnicamente eficientes, para posteriormente con los proyectos eficientes realizar un nuevo análisis utilizando cualquiera otra técnicas de selección, tal y como podemos observar en los trabajos presentados por Oral *et al.* (1991) y Linton *et al.* (2002).

C) Modelos de programación matemática

Esta tercera categoría evalúa y selecciona grupos de proyectos pero, a diferencia de todas las técnicas analizadas hasta ahora, nos permite contemplar aspectos de indudable interés práctico como es la consideración de un horizonte temporal de planificación, la existencia de multiplicidad de restricciones, no solo financieras, en distintos instantes temporales, junto con la posibilidad de que existan ciertas relaciones de complementariedad, interrelaciones, relaciones de precedencia, etc., entre los proyectos considerados. Con estos modelos, de manera genérica, se obtiene una o más soluciones que, verificando las restricciones establecidas, optimicen la/s función/es objetivo/s.

Dentro de este bloque, podemos distinguir: programación monobjetivo, multiobjetivo y programación por metas. A continuación, pasamos a describirlos.

C_1) Modelos de programación monobjetivo

Los modelos de programación monobjetivo comenzaron a utilizarse en el campo de la selección de carteras de proyectos, de una manera más prolífera y generalizada, a finales de la década de los 80 y principios de los 90 del siglo XX, intentando abordar todas las características que afectan a este tipo de problemas e ir avanzando los procedimientos técnicos de resolución de los problemas formulados. Con ello se consigue salvar las principales deficiencias de las técnicas utilizadas para seleccionar proyectos presentadas hasta entonces.

Los primeros estudios en este campo se realizaron utilizando la *Programación Lineal Monobjetivo Discreta*. En ellos, se trata de determinar el conjunto de proyectos a seleccionar de manera que se haga óptima alguna medida del valor del mismo, recogida mediante una función lineal, siempre que no sean rebasadas las disponibilidades de recursos y se verifique el resto de restricciones que puedan aparecer, todas ellas de carácter lineal. En estos modelos, se suele adoptar la hipótesis de que los proyectos no son fraccionables; es decir, las variables de decisión suelen ser binarias, $x_i \in \{0,1\}$, de manera que si $x_i = 0$ entonces el proyecto p_i no es seleccionado, mientras que si $x_i = 1$ dicho proyecto sí se selecciona. En consecuencia, estaríamos ante un problema de programación lineal binario con la siguiente estructura básica:

$$
\begin{aligned}
&Max\,(Min) \quad && f(x) = c_1x_1 + c_2x_2 + ... + c_Ix_I \\
&sujeta\ a && x \in B \\
& && x_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, ..., I
\end{aligned}
$$

donde:

$c = (c_1, c_2, ..., c_I)$ denota el vector de coeficientes de las función objetivo,

x es el vector de las variables de decisión: $x = (x_1, ..., x_I)$,

B es el conjunto factible o de oportunidades.

Presentaremos un sencillo ejemplo (Supuesto 10) procedente de Martino (1995, p. 45-47)[7], que será utilizado tanto para resolver la programación monobjetivo como para la programación multiobjetivo y programación por metas (apartados C_2 y C_3 siguientes, realizando pequeñas modificaciones en el ejemplo, dadas las características de los propios modelos).

Supongamos que una empresa de investigación pretende fabricar un conjunto de prototipos y aparatos experimentales, para lo que le plantea a las diferentes áreas de investigación que componen la empresa que presenten sus propuestas. Se recogen 16 proyectos candidatos $P = \{ p_1, p_2, ..., p_{16} \}$ para la realización de estos prototipos, que quedan reflejados por las variables $x = (x_1, ..., x_{16})$, y la empresa decide seleccionar aquellos que permitan recibir el mayor ingreso posible, cumpliendo con las restricciones siguientes:

- El presupuesto disponible para I&D en el siguiente año fiscal no supera 500$; y
- no se utiliza ni más de 1300 horas de fábrica, ni más de 390 horas de megaordenadores para la construcción de estos aparatos experimentales.
- Además, de los cinco primeros proyectos no se quieren seleccionar más de dos y el proyecto p_{10} solo se puede seleccionar si se ha seleccionado el proyecto p_{12}. Para realizar el proceso de selección de los proyectos se dispone de la información necesaria para la ejecución de cada uno de los 16 proyectos candidatos, reflejada en la Tabla 18.

Tabla 18. Matriz de datos de los diferentes proyectos para el Supuesto 10.

	Costes 100$ (c_i)	***Ingresos Mill.$ (I_i)***	***Horas fábrica (Hf_i)***	***Horas ordenador (Ho_i)***
P_1 (x_1)	48	47	60	29
P_2 (x_2)	38	41	189	48
P_3 (x_3)	40	18	105	51
P_4 (x_4)	43	38	174	23
P_5 (x_5)	35	342	191	20
P_6 (x_6)	25	375	55	51
P_7 (x_7)	26	122	196	47
P_8 (x_8)	41	152	120	34
P_9 (x_9)	53	81	208	51
P_{10} (x_{10})	81	67	59	33
P_{11} (x_{11})	97	71	224	28
P_{12} (x_{12})	51	153	82	40
P_{13} (x_{13})	89	74	66	52
P_{14} (x_{14})	78	29	176	24
P_{15} (x_{15})	97	62	109	28
P_{16} (x_{16})	90	90	235	50

A partir de estos datos, el problema planteado es el siguiente:

[7] Algunos de los datos de este Supuesto 10 ya han sido utilizados para el análisis cluster anterior.

$$
\begin{aligned}
&Max \quad \sum_{i=1}^{16} I_i \cdot x_i \\
&\text{s.a.} \ \sum_{i=1}^{16} c_i \cdot x_i \leq 500 \\
&\sum_{i=1}^{16} Hf_i \cdot x_i \leq 1300 \\
&\sum_{i=1}^{16} Ho_i \cdot x_i \leq 390 \\
&\sum_{i=1}^{5} x_i \leq 2 \\
&x_{10} \leq x_{12} \\
&x_i = \{0,1\} \quad i = 1,2,...,16.
\end{aligned}
$$

Una vez resuelto el problema, el resultado obtenido implica que el grupo de proyectos seleccionados y, por tanto, financiables debe ser: $S = \{p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{10}, p_{12}, p_{13}, p_{16}\}$.

Como se puede observar del problema anterior, este tipo de modelos presenta como principal ventaja su sencillez. No obstante, si el problema lineal binario de partida es de un tamaño considerable, nos encontramos con la dificultad de encontrar un algoritmo eficiente que sea capaz de resolverlo.

En este contexto, cabe destacar el trabajo de Lorie y Savage (1955), quienes fueron los primeros en plantear y resolver, en términos de programación lineal, el problema de selección de proyectos teniendo en cuenta, de forma explícita, la limitación temporal de recursos financieros. Posteriormente, Weingartner (1966) refina el trabajo anterior, pero no será hasta finales de los años 80 del siglo XX cuando empieza a aparecer multitud de trabajos que utilizan la programación monobjetivo para seleccionar proyectos. En los años 80-90, a medida que se va desarrollando el uso de la programación monobjetivo como técnica de selección de cartera de proyectos (grupo de proyectos), comienzan a surgir las primeras carencias, ya que el ámbito en el que se toman decisiones en cualquier organización está marcado, como hemos comentado anteriormente, por el deseo de tener en cuenta no un único objetivo, sino un conjunto de ellos que expresen con mayor fidelidad la realidad en la que se encuentran los proyectos candidatos.

Comienza así a contemplarse la optimización multiobjetivo (C_2) dentro del campo de la selección de proyectos.

C_2) Modelos de programación multiobjetivo

La estructura general de un problema multiobjetivo puede representarse esquemáticamente de la siguiente manera:

Opt. $F(x) = \left(f_1(x), f_2(x), ..., f_I(x),\right)$

s.a. $x \in B, x_i \in \{0,1\}, i = 1, 2, ..., I$

donde:

x es el vector de las variables de decisión $x = (x_1, ..., x_I)$ *para* $x_i \in \{0,1\}$;

$f_1(x), f_2(x), ..., f_z(x)$ son las funciones objetivo a ser optimizadas; y

B, tal y como hemos definido previamente, es el conjunto factible de proyectos.

Dado que normalmente la optimización simultánea de todos los criterios es casi imposible (muchos de ellos suelen estar en conflicto), el enfoque multiobjetivo, en lugar de una solución óptima, proporciona el conjunto de soluciones eficientes o *Pareto-óptimas*. Este conjunto está formado por las soluciones factibles no dominadas, es decir, para las que no existe otra solución factible que mejore algún criterio sin empeorar otro.

Para ilustrar el modelo, partiremos del Supuesto 10, presentado en el apartado anterior (C_1), teniendo en cuenta que ahora se quiere, además de maximizar el ingreso, minimizar el coste. En consecuencia, el problema quedaría formalizado de la siguiente manera:

$$\left(Max \sum_{i=1}^{16} I_i \cdot x_i,\ Min \sum_{i=1}^{16} c_i \cdot x_i \right)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i=1}^{16} Hf_i \cdot x_i \leq 1300$$

$$\sum_{i=1}^{16} Ho_i \cdot x_i \leq 390$$

$$\sum_{i=1}^{5} x_i \leq 2$$

$$x_{10} \leq x_{12}$$

$$x_i = \{0,1\} \qquad i = 1, 2, ..., 16.$$

Las siguientes carteras se corresponden con dos de las soluciones eficientes asociadas a este problema: $\{(p_5, p_6, p_7, p_8, p_{11}, p_{12}, p_{13}, p_{15}, p_{16});\ (p_1, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{12}, p_{15}, p_{16});...\}$.

Los modelos de programación multiobjetivo aplicados a la selección de proyectos y cartera de proyectos han sido ampliamente utilizados. Buen ejemplo de ello son los presentados por Czajkowski y Jones (1986) o los de Ringuest y Graves (1989, 1990).

El problema que se plantea con estos modelos es que el conjunto de soluciones eficientes está formado, normalmente, por un elevado número de puntos, información esta que puede ser difícil de manejar por el centro decisor. Ahora bien, esta posible carencia puede ser considerada una fortaleza si se parte del enfoque multiobjetivo como la primera etapa de un proceso decisional, que nos permite dividir la información inicial en dos subconjuntos: soluciones eficientes y no eficientes. Posteriormente, se podría elegir aquella/s que resulte/n "óptimas para el decisor", siendo en este momento donde se tendrían que introducir, de alguna manera, las preferencias del centro decisor (Romero, 1993).

Por otra parte, la dificultad técnica, comentada anteriormente, para la resolución de un problema lineal binario complejo, en un tiempo prudencial, se acentúa aún más si el problema tiene más de un objetivo. Ante ello, comienzan a aparecer algoritmos heurísticos que proporcionan soluciones aproximadas a problemas complejos, para los que resulta demasiado difícil, o quizás hasta imposible, resolverlos de una forma exacta. Un ejemplo de un heurístico específicamente desarrollado para seleccionar proyectos es el SS-PPS (Scatter Search for Project Porfolio Selection), heurístico que podemos encontrar en los trabajos de Carazo (2007) y Molina *et al.* (2007).

C_3) Modelos de programación por metas

En estos modelos se reemplaza la filosofía de optimización por una filosofía satisfaciente, bajo la óptica de que en muchas situaciones no se buscan soluciones óptimas sino soluciones que verifiquen determinados niveles de aspiración con las que el decisor se encuentra satisfecho. Para resolver el problema de programación por metas existen tres enfoques principales: programación por metas ponderadas, lexicográficas y minimax (Ballestero y Romero, 1998).

La formulación de un modelo de programación por metas, por cualquiera de las anteriores variantes, conlleva la fijación de niveles de aspiración para cada uno de los atributos considerados, cuya combinación generan las correspondientes metas. El objetivo consiste en determinar si existe alguna solución factible que verifique las metas establecidas. Al resolver un problema de programación por metas puede ocurrir que:

- El valor de la función objetivo = 0, y, por tanto, se alcanzan todos los niveles de aspiración.
- El valor de la función objetivo sea diferente de 0; en este caso la solución no verifica alguno de los niveles de aspiración, pero es la solución más próxima a los niveles de impuestos.

A continuación, resolveremos el supuesto planteado en los anteriores apartados utilizando la programación por metas ponderadas. Para este caso concreto, se supone que las metas establecidas por el agente decisor son: por un lado, obtener un mínimo de ingresos de 1250 millones de dólares y, por otro, que el coste no supere 500 mil dólares, teniendo en cuenta el resto de restricciones establecidas en el ejercicio anterior. En consecuencia, las metas son:

$$\sum_{i=1}^{16} I_i \cdot x_i + n_1 - p_1 = 1250 \quad \text{y} \quad \sum_{i=1}^{16} c_i \cdot x_i + n_2 - p_2 = 500,$$

donde n_j, p_j (j=1,2) son las variables de desviación negativa y positiva, respectivamente, que cuantificarán la falta y el exceso de logro de la meta con respecto al nivel de aspiración. En este caso, lo deseable es que n_1 y p_2 valgan cero, para que así el ingreso sea superior a 1250 y el coste inferior a 500. En consecuencia, si aplicamos la programación por metas ponderadas, considerando que las 2 metas son igualmente importantes, el problema a resolver es el siguiente:

$$
\begin{aligned}
& Min\ \frac{n_1}{1250} + \frac{p_2}{500} \\
& \text{s.a.}\ \sum_{i=1}^{16} I_i \cdot x_i + n_1 - p_1 = 1250 \\
& \sum_{i=1}^{16} c_i \cdot x_i + n_2 - p_2 = 500 \\
& \sum_{i=1}^{16} Hf_i \cdot x_i \leq 1300 \\
& \sum_{i=1}^{16} Ho_i \cdot x_i \leq 390 \\
& \sum_{i=1}^{5} x_i \leq 2 \\
& x_{10} \leq x_{12} \\
& x_i = \{0,1\};
\end{aligned}
$$

La siguiente solución verifica todos los niveles de aspiración: (0,0,0,0,1,1,1,1,1,0,1,0,1,0,0,1), la cual conlleva el siguiente conjunto de proyectos:

$$S = \{p_5, p_6, p_7, p_8, p_9, p_{11}, p_{13}, p_{16}\}.$$

La programación por metas constituye uno de los enfoques multicriterio más utilizado en la práctica, debido a su versatilidad y adaptabilidad en distintos contextos decisionales. Entre los numerosos trabajos que podemos encontrar de la aplicación de este enfoque en el contexto de la selección de proyectos, podemos mencionar el de Schniederjans y Wilson (1991), Santhanam y Kyparisis (1995) y Lee y Kim (2001). El principal inconveniente de esta técnica se encuentra en que los decisores deben determinar *a priori* los niveles de aspiración para cada uno de los atributos, tarea que, en ocasiones, puede ser difícil y más aún en el contexto de la selección de proyectos en los que la incertidumbre es un factor clave. Además, la selección de estos niveles de aspiración puede sesgar en gran medida la decisión hacia una determinada selección.

Para finalizar, queremos destacar que, a partir de esta breve recapitulación de las técnicas más utilizadas a lo largo de los años para la selección de proyectos, se desprende que la calidad de los resultados obtenidos tras la aplicación de una técnica no solo depende de la maestría en su uso, sino también de la propia técnica utilizada y, en consecuencia, la elección de una cualquiera de ellas está condicionada por la problemática concreta, dentro de la selección de proyectos que se intente abordar y del tipo de información disponible.

Queremos señalar que existe una serie de trabajos que recomiendan utilizar más de una técnica, ya sea para observar si los resultados obtenidos son similares y, en consecuencia, más fiables, o bien combinándolas, utilizando (por ejemplo, para hacer un filtro inicial de los proyectos eliminando aquellos que no cumplan unas condiciones iniciales) una técnica de "medida del beneficio" y luego, para la selección de proyectos, un modelo de programación matemática. En esta línea, podemos mencionar los trabajos de Henriksen y Traynor (1999), Spradlin y Kutoloski (1999), Linton *et al.* (2002), Coldrick *et al*. (2002, 2005)**,** Gustafsson y Salo (2005), Lawson *et al.* (2006), o incluso los de Brans *et al.* (1986) y Mavrotas *et al.* (2003, 2006), quienes utilizan modelos de ranking (Promete y Eletre-III) para realizar una primera selección de proyectos y, posteriormente, se apoyan en algún modelo de programación matemática para seleccionar los proyectos más adecuados.

Por otra parte, también se puede apreciar que, a lo largo de los años, no solo han ido cambiando o evolucionando las técnicas a emplear y su uso, sino también el problema a resolver. En la actualidad, el objetivo ya no se centra tanto en seleccionar, con los recursos disponibles, los mejores proyectos, sino en elegir y determinar la cartera de proyectos estableciendo en qué momento deben comenzar a ejecutarse los proyectos seleccionados. Si tenemos en cuenta ese nuevo problema, parece que el futuro se encuentra en apoyarse en la flexibilidad de los modelos de programación matemática, los cuales permiten analizar la situación presentada en su conjunto, contemplando diferentes objetivos (problema multiobjetivo) y restricciones de diferente naturaleza dentro de un horizonte temporal de planificación.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, pensamos que es fundamental partir de este tipo problemas para presentar un modelo global que tenga en cuenta todos los aspectos anteriormente comentados y que solucione aspectos no completamente resueltos hasta este momento, entre los que cabe destacar el estudio de las interacciones entre proyectos y el análisis de la planificación temporal en toda su magnitud, de manera que se consideren los recursos disponibles en cada momento, en qué momento se producen las relaciones o sinergias entre proyectos, si se pueden realizar transvases de recursos de un periodo a otros… En este sentido, empiezan a surgir propuestas de modelos globales, como el diseñado dentro de nuestro grupo (ver Caballero *et al*. 2007; Carazo, 2007; Carazo *et al*., 2007) para resolver el problema de la selección y planificación temporal de una cartera de proyectos por parte de cualquier organización; todo ello sin olvidar que, en última instancia, el papel de los modelos es apoyar o facilitar la toma de decisiones, no tomarlas por sí mismos, ya que la respuesta final sobre qué proyectos financiar recae, en última instancia, en el agente decisor.

5. Conclusiones

Una vez presentado el trabajo, nos parece fundamental puntualizar dos aspectos importantes. En primer lugar, aunque existían estudios que analizaban individualmente cada una de estas técnicas, el estudio aquí presentado viene a aportar una visión global del campo, dado que no existían (o no son conocidos por parte de los autores) trabajos que analicen todas estas técnicas de manera exhaustiva. Con este trabajo, además de describir y analizar los diferentes modelos considerados hasta nuestros días, hemos contribuido a:

- presentar un ejemplo sencillo de cada uno de los modelos considerados, aportando una visión longitudinal de las diferentes técnicas;

- ofrecer información útil sobre las sucesivas incorporaciones que se han realizado, indicando cuáles son las ventajas e inconvenientes de cada una de las técnicas, contextualizando las necesidades que las han generado e informando de cómo las diferentes tendencias les han afectado.

En segundo lugar, el análisis realizado a las diferentes técnicas presentadas ha permitido observar que existe una carencia que debe ser resuelta, ya que los estudios presentados hasta el momento no resuelven el problema de la selección y planificación temporal de cartera de proyectos en su conjunto.

El hecho anterior lleva a que surja la necesidad de tender a modelos de selección de carteras de proyectos generales, como el propuesto por los autores en Carazo *et al.* (2007), que permitan resolver cualquier problema de selección y planificación de cartera de proyectos y que tengan en cuenta simultáneamente la selección de carteras de proyectos (analizando las interdependencias) y la planificación temporal de los proyectos que las componen. Se incorpora así la apreciación de la no independencia de ambos aspectos y la idea de que su conjunción va a permitir una mejor distribución de los recursos a lo largo del horizonte temporal fijado, que permita una mejora en algo que es clave para toda organización empresarial: la selección de portfolios eficientes en poco tiempo.

Referencias

Apperson, C., Arefzadeh, F., Dinsmore, A., Grabowskki, R., May, D., Morandi, K., Tawney, B. y White, K.P. (2005). “*Project selection for technology investment*”, IEEE Conference Proceedings of the 2005 Systems and Information Engineering Design Symposium, 151-157.

Archer, N.P. y Ghasemzadeh, F. (1999). *"Project portfolio selection techniques: a review and suggested integrated approach"*, En: Dye, L.D. y Pennypacker, J.S., editores. Project Portfolio Management: selecting and prioritizing projects for competitive advantage, West Chester, PA, USA: Center for Business, 207-237.

Baker, N.R. y Pound, W.H. (1964). *"R&D project selection: where we stand"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 11, 4, 124-134.

Baker, N.R. (1974). *"R&D project selection models: an assessment"*, IEEE Transactions on Engineering Management, EM-21, 4, 165-171.

Baker, N.R y Freeland, J. (1975). *"Recent advances in R&D benefit measurement and project selection methods*", Management Science, 21, 10, 1164-1175.

Ballestero, E. y Romero, C. (1998). *Multiple Criteria Decision Making and its Applications to Economic Problems*, Kluwer, Boston.

Barba-Romero, S. y Pomerol, J.C. (1997). *Decisiones multicriterio, fundamentos teóricos y utilización práctica*, Colecciones de Economía. Servicio de Publicaciones Universidad de Alcalá, Madrid.

Brans, J.P., Vincke, B.H. y Mareschal, B. (1986). *"How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method"*, European Journal of Operational Research, 24, 228-238.

Caballero, R., Gómez, T., Molina, J., Carazo, A.F. y Hernández-Díaz, A.G. (2007). *"A general model for multi-objetive project portfolio selection"*, 19th International Conference on Multiple Criteria Decision Making. MCDM for Sustainable Energy and Transportation Systems, Auckland (Nueva Zelanda).

Carazo, A.F. (2007). *"Selección y planificación temporal de una cartera de proyectos bajo un enfoque multicriterio"*, Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.

Carazo, A.F., Gómez T., Molina, J., Hernández-Díaz, A, Caballero, R. y Guerrero, F. (2007). *"Selección y planificación de cartera de proyectos: formalización de un modelo genérico"*, RECT@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA.

Charnes, A., Cooper, W.W. y Rhodes, E. (1978). "*Measuring the efficiency of decision making units*", European Journal of Operational Research, 2, 3, 429-444.

Chien, C. (2002). *"A portfolio-evaluation framework for selecting R&D projects"*, R&D Managent, 32, 4, 359-368.

Chiou, H-K. y Tzeng, G-H. (2004). "*DEA with imprecise data for R&D project evaluation in Taiwan*", En MOPGP 04, 6th Multi Objective Programming and Goal Programming Conference. New Trends and Applications.

Cho, K.T. y Kwon, C.S. (2004). "*Hierarchies with dependence of technological alternatives: a cross-impact hierarchy process*", European Journal of Operational Research, 156, 2, 420-432.

Cleland, D.I. y Ireland, L.R. (2002). *Project management strategic design and implementation*. McGraw-Hill Professional, New York.

Coldrick, S., Lawson, C.P., Lockwood, C. y Ivey, P.C. (2002). "*A decision framework for R&D project selection*", Engineering Management Conference, IEEE International, 1, 413-418.

Coldrick, S., Longhurst, P., Ivey, P.C. y Hannis, J. (2005). "*An R&D options selection model for investment decisions*", Technovation, 25, 3, 185-193.

Cook, W.D. (2004). "*Qualitative data in DEA*", En: Cooper, W.W., Seifor, L.M. and Zhu, J., editores. Envelopment Analysis, Kluwer Acadenic Publishers, London, 153-176.

Cooper, W.W., Park, K.S. y Yu, G. (1999b). "*IDEA and AR-IDEA: models for dealing with imprecise data in DEA*", Management Science, 45, 4, 597-607.

Cooper, R.G., Edgett, S.J. y Kleinschmidt, E.J. (2001). "*Portfolio management for new product development: results of an industry practices study*", R&D Management, 31, 4, 361-378.

Czajkowski, A.F. y Jones, S. (1986). *"Selecting interrelated R&D projects in space technology planning"*, IEEE Transactions on Engineering Management, EM-33, 1, 17-24.

Duarte, B.P.M. y Reis, A. (2006). *"Developing a project evaluation system based on multiple attribute value theory"*, Computers & Operations Research, 33, 5, 1488-1504.

Dye, L.D. y Pennypacker, J.S. (1999). *"An introduction to project portfolio management"*, En: Dye, L.D. y Pennypacker, J.S., editores. Project Portfolio Management: selecting and prioritizing projects for competitive advantage, West Chester, PA, USA: Center for Business Practices. XI-XVI.

Easton, A. (1973). *Complex managerial decisions involving multiple objectives*, Jonh Wiley and Sons, New York.

Eilat, H., Golany, B. y Shtub, A. (2006). *"Constructing and evaluating balanced portfolios of R&D projects with interactions: a DEA based methodology"*, European Journal of Operational Research, 172, 1018-1039.

Ellis, L.W. (1984). *"Viewing R&D project financially"*, Research Management, 7, 2, 29-34.

Fernández, E. y Navaro, J. (2005). *"Computer-based decision models for R&D project selection in public organizations"*, Foundations of Computing and Decision Sciences, 30, 2, 103-131.

Fox, G.E., Baker, N.R. y Bryant, J.L. (1984). *"Economic models for R&D project selection in the presence of project interactions"*, Management Science, 30, 890-902.

Freeman, C. (1982). *The Economics of industrial Innovation*, Frances Printer, London.

Gear, A.E. y Lockett, A.G. (1973). *"A dynamic model of multistage aspects of research and development portfolios"*, IEEE Transactions on Engineering Management, EM20, 1, 22-29.

Gear, A.E. (1974). *"A review of some recent developments in portfolio modelling in applied research and development"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 21, 3, 119-125.

Graves, S.B. y Ringuest, J.L. (1991). *"Evaluating competing R&D investments"*, Research Technology Management, 34, 4, 32-35.

Graves, S.B. y Ringuest, J.L. (2003). *Models & methods for project selection: concepts from management science, finance and information technology*, Kluwer Academic Publishers, Boston.

Gustafsson, J. y Salo, A. (2005). *"Contingent portfolio programming for the management of risk project"*, Informs, 53, 6, 946-956.

Hall, D.L. y Nauda, A. (1990). *"Interactive approach for selecting IR&D projects"*, IEEE Transaction on Engineering Management, 37, 2, 126-131.

Hartmann, M. y Hassan, A. (2006). *"Application of real options analysis for pharmaceutical R&D project valuation-empirical results from a survey"*, Research Policy, 35, 343-354.

Heidenberger, K. (1996). *"Dynamic project selection and funding under risk: a decision tree based MILP approach"*, European Journal of Operational Research, 95, 2, 284-298.

Heidenberger, K. y Stummer, C. (1999). *"Research and development project selection and resource allocation: a review of quantitative modelling approaches"*, International Journal of Management Reviews, 1, 197-224.

Henriksen, A.D. y Traynor, J.A. (1999). *"A practical R&D project selection scoring tool"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 46, 2, 158-170.

Hess, S.W. (1993). *"Swinging on the branch of a tree: project selection applications"*, Interfaces, 23, 6, 5-12.

Howard, R.A. y Metheson, J.E. (1984). *"Influence diagrams"*, En: Howard, R.A. y Metheson, J.E., editores. Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis, Vol. II: Professional Collection, Strategic Decision Group, Menlo Park, CA, 719-762.

Jackson, B. (1983). *"Decision methods for selecting a portfolio of R&D projects"*, Research Management, 26, 5, 21-26.

Keeney, R.L. y Raiffa, H. (1976). *Decision with multiple objectives: preferences and value tradeoffs*, John Wiley and Sons, New York.

Kimms, A. (2001). *Mathematical Programming and Financial Objectives for Scheduling Projects*, Kluwer, Boston.

Lawson, C.P., Longhurst, P.J. y Ivey, P.C. (2006). *"The application of a new research and development project selection model in SMEs"*, Technovation, 26, 2, 242-250.

Lee, J.W. y Kim, S.H. (2001). *"An integrated approach for interdependent information system project selection"*, International Journal of Project Management, 19, 2, 111-118.

Liberatore, M.J. y Titus, G.J. (1983). *"The practice of Management Science R&D Project Management"*, Management Science, 29, 8, 962-974.

Liberatore, M.J. (1987). *"An extension of the analytic hierarchy process for industrial R&D project selection and resource allocation"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 34, 4, 12-18.

Linton, J.D., Walsh, S.T. y Morabito, J. (2002). *"Analysis, ranking and selection of R&D projects in a portfolio"*, R&D Management, 32, 2, 139-148.

Lockett, G., Hetherington, B. y Yallup, P. (1986). *"Modeling a research portfolio using AHP: a group decision process"*, R&D Management, 16, 2, 151-160.

Lorie, J.H. y Savage, L.J. (1955). "*Three problems in Rationing Capital*", Journal of Business, 28, 229-239.

Lucas, H. y Moore, J. (1976). *"A multiple-criterion scoring approach to information system project selection"*, Infor, 14, 1, 1-12.

Martino, J.P. (1995). *Research and development project selection*. Wiley Series in Engineering & Technology Management, New York.

Mathieu, R.G. y Gibson, J.E. (1993). *"A methodology for large-scale R&D planning based on cluster analysis"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 40, 3, 283-292.

Mavrotas, G., Diakoulaki, D. y Capros, P. (2003). *"Combined MCDA-IP approach for project selection in the electricity market"*, Annals of Operations Research, 120, 159-170.

Mavrotas, G., Diakoulaki, D. y Caloghirou, Y. (2006). *"Project prioritization under policy restrictions. A combination of MCDA with 0-1 programming"*, European Journal of Operational Research 171, 1, 296-308.

Meredith, J.R. y Mantel, S.J. (1999). *"Project Selection"*, En: Dye, L.D. y Pennypacker, J.S., editores. Project Portfolio Management: selecting and prioritizing projects for competitive advantage, West Chester, PA, USA: Center for Business Practices, 135-167.

Molina, J., Hernández-Díaz, A., Carazo, A.F., Caballero, R. y Gómez, T. (2007). *"Instance generator for a Multi-Objetive project porfolio selection problem"*, EURO XXII. 22nd European Conference On Operacional Research. Prague (Czech Republic).

Moore, J.R. y Baker, N.R. (1969). *"An analytical approach to scoring model design-application to research and development project selection"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 16, 3, 90-98.

Oral, M., Kettani, O. y Lang, P. (1991). *"A methodology for collective evaluation and selection of industrial R&D project"*, Management Science, 37, 7, 871-885.

Ormala, E. (1986). *Analysis and supporting R&D project evaluation*, Technical Research Centre of Finland, Espoo.

Paralera, C. (2005). *"Localización de incineradoras de materiales específicos de riesgo en Andalucía bajo un enfoque multicriterio"*, Tesis Doctoral, Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.

Pessemier, E.A. y Baker, N.D. (1971). *"Project and program decisions in research development"*, R&D Management, 2, 1, 3-14.

Ringuest, J.L. y Graves, S.B. (1989). *"The linear multi-objetive R&D project selection problem"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 36, 1, 54-57.

Ringuest, J.L. y Graves, S.B. (1990). *"The linear R&D project selection problem. An alternative to net present value"*, IEEE Transactions on Engineering Management, 37, 2, 143-146.

Ríos, S., Bielza, C. y Mateos, A. (2002). *Fundamentos de los Sistemas de Ayuda a la Decisión*, RA-MA, Madrid.

Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: conceptos, técnicas y aplicaciones*, Alianza editorial, Madrid.

Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority, setting resource allocation,* McGraw-Hill, New York.

Santhanam, R. y Kyparisis, J. (1995). *"A multiple criteria decision model for information system project selection"*, Computers Operations Research, 22, 8, 807-818.

Savage, L.J. (1954). *The Foundations of Statistics,* John Wiley, New York.

Schniederjans, M.J. y Wilson, R.L. (1991). "*Using the analytic hierarchy process and goal programming for information system project selection*", Information & Management, 20, 5, 333-342.

Spradlin, C.T. y Kutoloski D.M. (1999). "*Action-oriented portfolio management*", Research Technology Management, 42, 2, 26-32.

Smith, S. y Baker, J. (1999). *"Benefit-cost ratio: selection tool or trap"*, En: Dye, L.D. y Pennypacker, J.S., editores. Project Portfolio Management: selecting and prioritizing projects for competitive advantage, West Chester, PA, USA: Center for Business Practices, 281-285.

Weingartner, H.M. (1966). "*Capital budgeting of interrelated projects: survey and synthesis*", Management Science, 12, 485-516.