

GENERIC MULTI-ATTRIBUTE ANALYSIS : UN SISTEMA DE AYUDA A LA DECISIÓN

Jiménez, A., Ríos-Insua, S., Mateos, A.

Departamento de Inteligencia Artificial, Facultad de Informática,

Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Generic Multi-Attribute Analysis (GMAA) es un Sistema de Ayuda a la Decisión (SAD) basado en el ciclo del Análisis de Decisiones para apoyar el proceso de toma de decisiones en problemas complejos con múltiples objetivos conflictivos. El sistema se basa en un modelo en utilidad multiatributo aditivo, en el que se permite incertidumbre sobre las consecuencias de las distintas alternativas a evaluar e imprecisión en los métodos de cuantificación de las preferencias del decisor. Como parte importante del sistema se incluyen distintos tipos de análisis de sensibilidad que permitirán al decisor una mejor comprensión de las implicaciones que conlleva cada elección.

INTRODUCCIÓN

Muchos problemas de decisión tienen múltiples objetivos y éstos pueden ser conflictivos en el sentido de que mejoras en términos de un objetivo sólo pueden ocurrir a costa del deterioro en algunos de los otros. Por tanto, el decisor debe tener en cuenta el equilibrio entre los diferentes grados de satisfacción de unos y otros objetivos. Además, los problemas de decisión reales pueden llevar asociada mucha incertidumbre, no pudiéndose predecir con certeza las consecuencias de cada alternativa bajo consideración. Por lo tanto, tomar decisiones en estos problemas puede superar nuestra capacidad cognoscitiva siendo necesario un análisis formal.

El Análisis de Decisiones (AD) es un procedimiento sistemático y lógico, basado en un conjunto de axiomas, para analizar racionalmente problemas de decisión complejos (Keeney y Raiffa, 1976). El AD se desarrolla bajo la hipótesis de que lo atractivo de una alternativa para el decisor dependerá de las probabilidades de las posibles consecuencias y de las preferencias del decisor con respecto a éstas últimas.

El Sistema de Ayuda a la Decisión GMAA se basa en el ciclo del AD e intenta mitigar muchas de las dificultades de cálculo asociadas a las distintas etapas de las que consta, especialmente en el uso de funciones de utilidad multiatributo.

En los distintos apartados de los que consta este trabajo se presentan las etapas del ciclo del AD. Se incluirán las ideas principales asociadas así como su tratamiento en el sistema desarrollado.

1. IDENTIFICACIÓN DE OBJETIVOS

Esta primera etapa del ciclo del AD consiste en la identificación de objetivos que representen todos los aspectos relevantes relacionados con el problema (MacCrimmon, 1969), así como la especificación de atributos que midan el nivel o grado de satisfacción de los objetivos a los que se encuentran asociados para las distintas alternativas o estrategias.

De toda esta información deberá emerger una jerarquía de objetivos con aquéllos asociados a intereses generales en los niveles más altos y aquéllos más específicos en los niveles más bajos (Manheim y Hall, 1967). Son múltiples los beneficios asociados a la utilización de una jerarquía para modelizar problemas de decisión complejos con múltiples objetivos (Brownlow y Watson, 1987).

El sistema GMAA no ofrece ninguna ayuda para la identificación de objetivos y especificación de atributos, que se consideran como una etapa de modelización previa a la utilización del SAD.

El sistema parte de la introducción de la jerarquía de objetivos que representa el problema complejo a analizar. Para ello, fijando un objetivo global, se permite la creación o eliminación de objetivos mediante un menú desplegable que se muestra al pulsar el botón derecho del ratón sobre cualquiera de los objetivos ya creados, ver Figura 1.

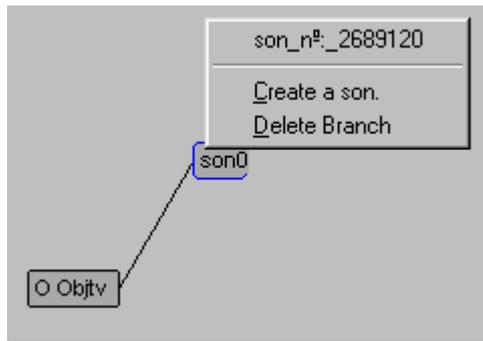


Figura 1. Construyendo la jerarquía de objetivos

Pulsando el botón izquierdo del ratón sobre cualquier nodo de la jerarquía se mostrará una ventana en la que el decisor podrá introducir información relacionada con él, como su etiqueta, nombre y descripción. En el caso de que el objetivo esté situado en el último nivel de la jerarquía se tendrá, además, que introducir las unidades y rango del atributo asociado, ver Figura 2.

Figura 2. Información asociada a un objetivo del nivel más bajo de la jerarquía

2. REPRESENTACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LAS ALTERNATIVAS

Una vez construida la jerarquía de objetivos e introducida la información demandada en los distintos objetivos, pasamos a la siguiente etapa del ciclo del AD, la identificación de alternativas a evaluar (Kirkwood, 1997; Clemen, 1986) y la descripción de sus consecuencias o impactos en términos de los atributos asociados a los objetivos del nivel más bajo de la jerarquía.

Una de las características importantes del sistema desarrollado es que se permite describir para cada atributo bajo incertidumbre, las consecuencias de las distintas alternativas bajo consideración a través de intervalos de valores uniformemente distribuidos.

El sistema permite la introducción de nuevas alternativas, su modificación y su eliminación, ver Figura 3. Además, comprobará la consistencia entre los valores de las consecuencias de las distintas alternativas y los rangos definidos en los atributos del problema.

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 4
Atributo 1	5.000	4.500	4.250	2.000
Atributo 7	0.000	0.000	0.000	0.700
Atributo 2	2.335	2.050	1.050	2.300
Atributo 4	3.000	5.000	33.000	3.000
Atributo 6	0.000	12.500	30.000	160.000
Atributo 3	68.150	60.500	24.000	65.500
Atributo 5	0.000	150.000	403.000	20.000

Figura 3. Consecuencias de las alternativas bajo consideración

3. CUANTIFICACIÓN DE LAS PREFERENCIAS DEL DECISOR

La cuantificación de las preferencias del decisor conlleva la asignación de utilidades individuales a los atributos bajo consideración, que representan las preferencias del decisor sobre las posibles consecuencias de las alternativas, y la asignación de pesos o factores de escala a los objetivos de la jerarquía, que representan su importancia relativa.

Otra de las características importantes del sistema desarrollado es que admite imprecisión, a través de intervalos de valores, en las respuestas del decisor a las cuestiones probabilísticas que se le plantean en los distintos métodos que proporciona el sistema, tanto para la asignación de utilidades individuales como para el cálculo de pesos. Esta imprecisión, al igual que la incertidumbre sobre las consecuencias de las alternativas, será posteriormente explotada tanto en la evaluación de las alternativas bajo consideración como en el posterior Análisis de Sensibilidad.

Concretamente, el sistema propone tres métodos para la asignación de utilidades individuales: la construcción de una función de utilidad utilizando la combinación de dos procedimientos estándar ligeramente modificados, método del fractil y método de loterías extremas (Jiménez, 2002), ver Figura 4; la construcción de una función de utilidad lineal a trozos, ver Figura 5; la asignación de utilidades imprecisas para valores discretos de un atributo, ver Figura 6; y la asignación directa mediante una escala subjetiva.

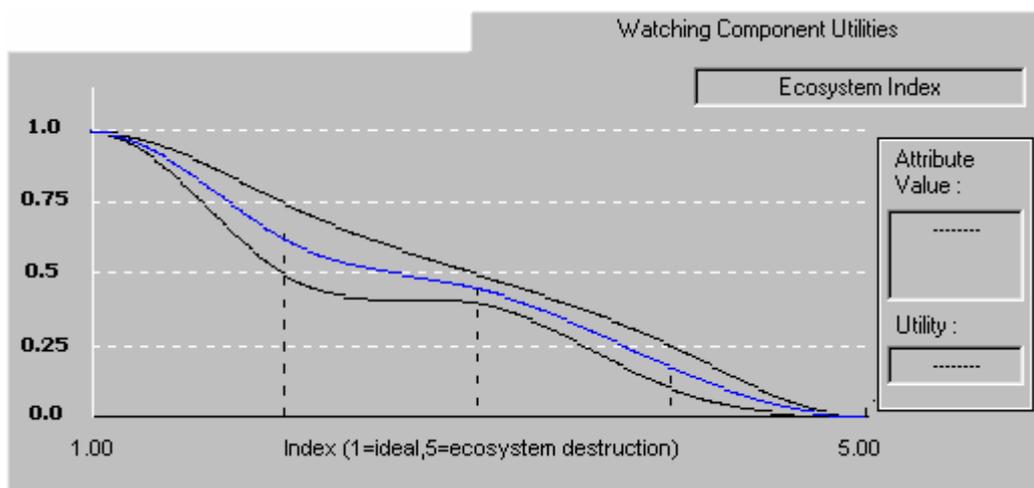


Figura 4. Familia de funciones de utilidad

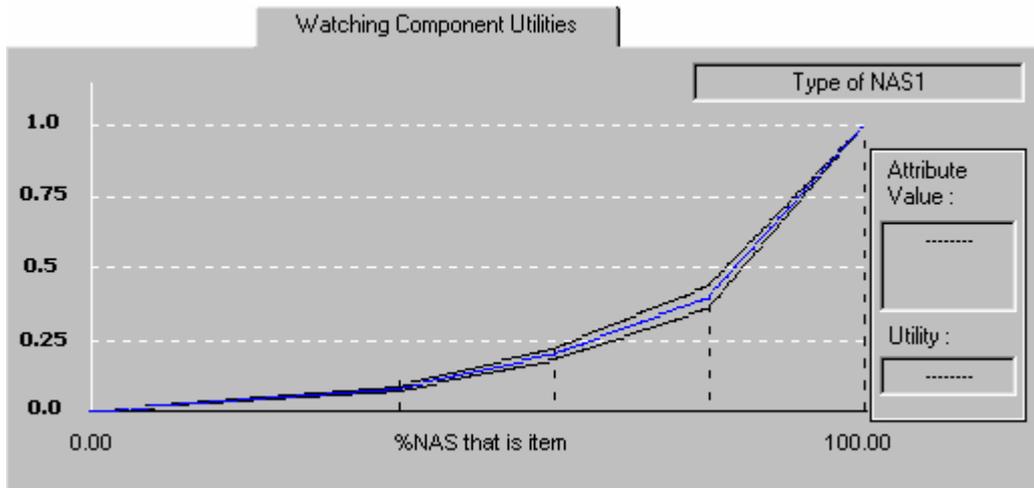


Figura 5. Familia de funciones de utilidad lineales a trozos

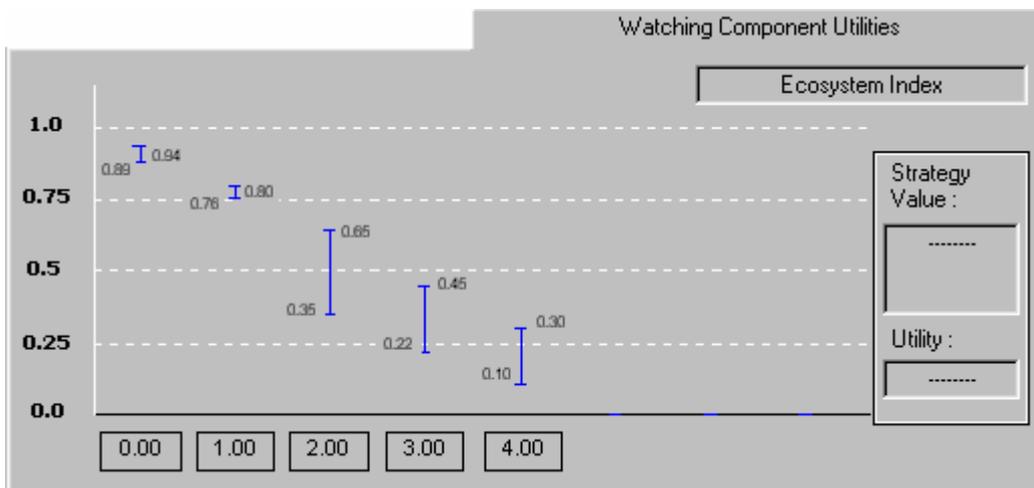


Figura 6. Utilidades imprecisas para valores discretos de un atributo

Con respecto al cálculo de la importancia relativa de los objetivos en la jerarquía, a través de pesos, el sistema ofrece dos métodos, una asignación directa de pesos y una asignación de pesos basada en equilibrios (Keeney y Raiffa, 1976), ver Figura 7.

Weights Assignment based on tradeoffs			
Assignment [---, P ; ---, 1-P] equivalent to ----			
Direct Assignment			
Specify the lower and upper bounds for each one of the sons:			
Objetivo 2.1	Lower Bound:	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound: <input type="text" value="0"/>
Objetivo 2.2	Lower Bound:	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound: <input type="text" value="0"/>
	Lower Bound:	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound: <input type="text" value="0"/>
	Lower Bound:	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound: <input type="text" value="0"/>
	Lower Bound:	<input type="text" value="0"/>	Upper Bound: <input type="text" value="0"/>

Figura 7. Métodos para la asignación de pesos

El sistema, a partir de los datos imprecisos proporcionados por el decisor en ambos métodos, obtendrá para cada uno de los objetivos bajo consideración un peso medio normalizado y un intervalo de pesos normalizado.

Finalmente, los pesos de los atributos sobre el objetivo global, que son indicadores de la influencia de cada criterio individual en la decisión, se obtienen multiplicando los pesos medios normalizados y los extremos de los intervalos de pesos normalizados en el camino a través de la jerarquía de objetivos desde cada uno de los atributos hasta el objetivo global, ver Figura 8.



Figura 8. Pesos de los atributos sobre la decisión

4. EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS BAJO CONSIDERACIÓN

Este paso implica la evaluación de cada una de las alternativas por medio de un modelo de utilidad multiatributo para identificar la mejor. Cada alternativa se caracteriza por su evaluación en cada uno de los atributos. La teoría de utilidad multiatributo proporciona procedimientos para hacerlo. Calculamos una función de utilidad u , que asigna un número $u(x)$ a cada posible consecuencia x . Esta función de utilidad puede representar la actitud hacia el riesgo del experto, los equilibrios entre los diferentes impactos y grupos de personas y las preferencias para el impacto en el tiempo.

Uno de los conceptos más importantes dentro de la teoría de la utilidad multiatributo son las condiciones de independencia. Sujeto a una variedad de estas condiciones el cálculo de u se puede descomponer en partes más fáciles de manejar. Nuestro objetivo es encontrar funciones simples f, u_1, u_2, \dots, u_n de forma que $u(x_1, \dots, x_n) = f(u_1(x_1), \dots, u_n(x_n))$, reduciéndose el cálculo de u a los de f y u_i . Las u_i 's son las funciones de utilidad individuales definidas en los atributos de la jerarquía. La forma de f dependerá de las condiciones de independencia que se verifiquen.

En nuestro caso hemos considerado la forma aditiva como una aproximación que sería válida basándonos en las razones descritas en (Raiffa, 1982 y Stewart, 1996). Por tanto, dada una alternativa S_q con consecuencias $x^q = (x_1^q, x_2^q, \dots, x_n^q)$, la función de utilidad global toma la expresión

$$u(S_q) = \sum_{i=1}^n w_i u_i(x_i^q)$$

donde w_i son los pesos de los criterios sobre la decisión, calculados en la etapa anterior.

La evolución del conjunto de alternativas y su ordenación se hace automáticamente. El sistema proporciona una representación gráfica con barras que incluye sus utilidades globales y la ordenación, ver Figura 9.

La línea vertical representa la utilidad media (usada para hacer la ordenación y obtenida tomando estimaciones precisas de los diferentes parámetros) mientras que los rectángulos están limitados por las utilidades mínima y máxima, obtenidas mediante la aplicación del modelo en utilidad aditivo tomando las utilidades mínimas y máximas en los atributos, respectivamente, así como los extremos inferiores y superiores de los intervalos de pesos normalizados de los atributos sobre la decisión.

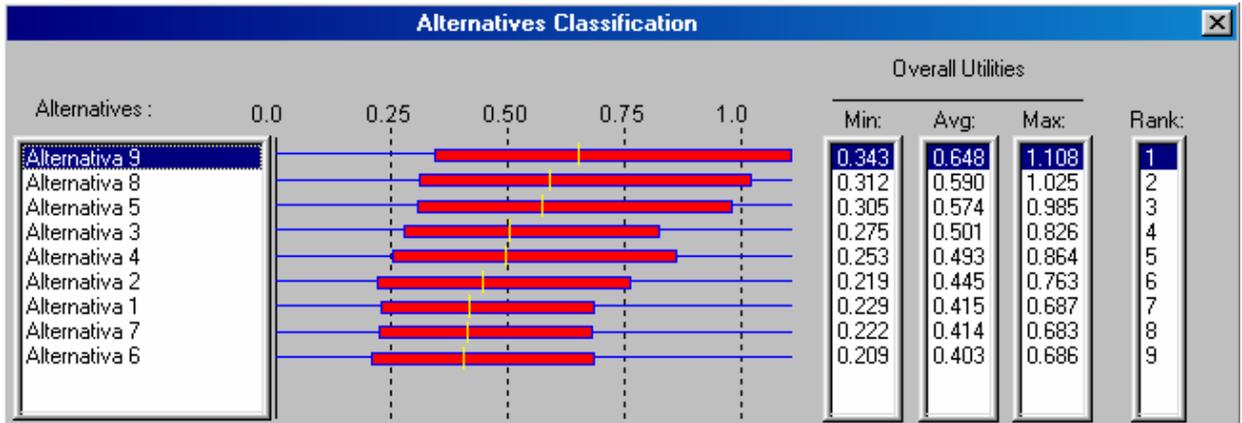


Figura 9. Evaluación de las distintas alternativas bajo consideración

5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

El Análisis de Sensibilidad (AS) debe verse como un medio de estimulación que lleva al decisor a pensar de una forma más profunda en el problema. A través de este proceso de reflexión y mayor acercamiento o entendimiento del problema, la percepción tiene el decisor puede variar, teniendo que volver dentro del ciclo iterativo en que consiste el AD a alguna de las etapas anteriores en un proceso de revisión.

En el sistema implementado se han desarrollado varios tipos de Análisis de Sensibilidad. En primer lugar, el decisor tiene la posibilidad de ver una serie de ventanas con información que le puede ser muy útil para entender por qué se ha obtenido una determinada ordenación alternativas:

- *Stacked Bar Ranking*, muestra de forma gráfica la utilidad media asignada a cada alternativa desglosando la aportación que tienen sobre ella los distintos atributos, ver Figura 10.

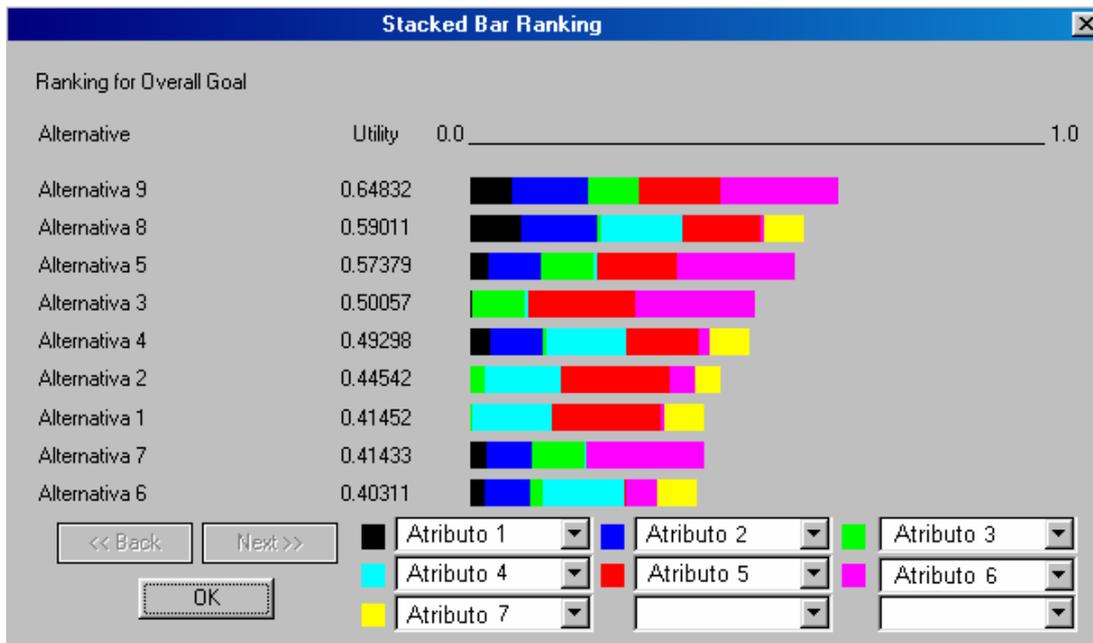


Figura 10 Stacked Bar Ranking

- *Measure Utilities for Alternatives*, muestra gráficamente la utilidad en los distintos atributos de las consecuencias para una alternativa a través de barras cuya anchura se corresponde con el peso de dicho atributo
- *Compare Alternatives Graph*, compara dos alternativas seleccionadas con respecto a los atributos del problema indicando la diferencia entre las utilidades asociadas a sus consecuencias, ver Figura 11.

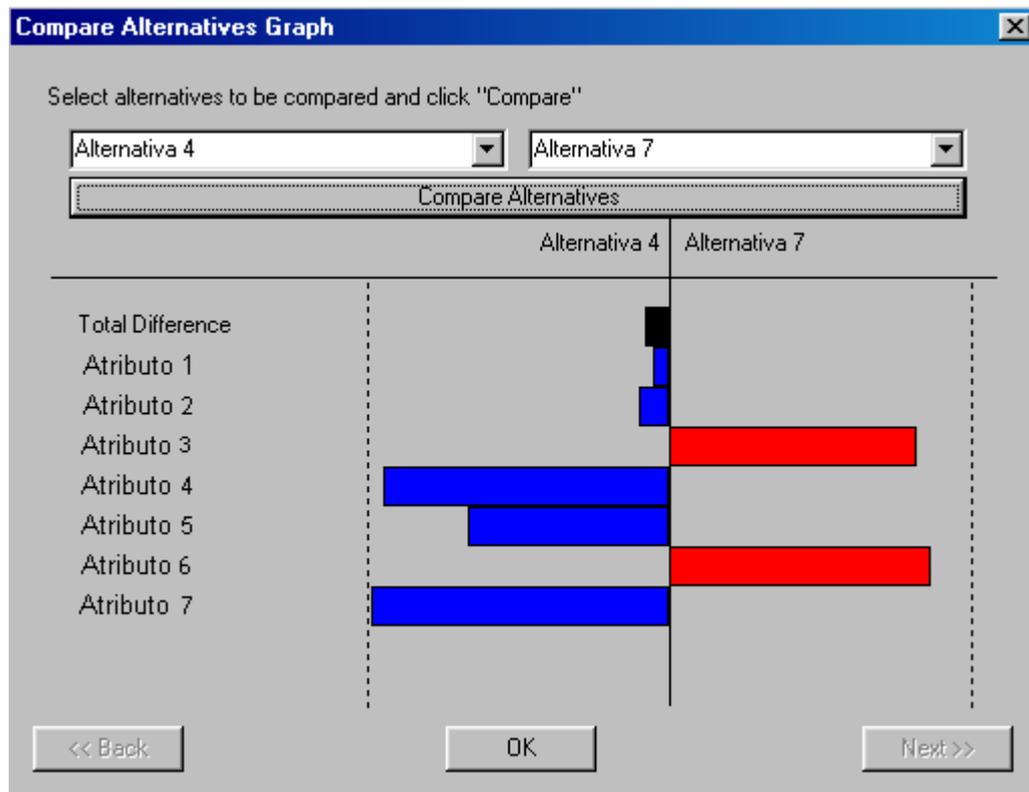


Figura 11. Compare Alternatives Graph

- *Weights and Attribute Values*, muestra la jerarquía de objetivos con los pesos medios normalizados de los objetivos que la componen y las consecuencias en los atributos de una alternativa seleccionada por el decisor.
- *Paired Attributes Correlation*, permite comparar pares de atributos seleccionados para todas las alternativas a través de una representación gráfica de sus utilidades en esos atributos escogidos.

El AS clásico consiste en modificar uno o varios parámetros del sistema, en este caso consecuencias, utilidades individuales o pesos, y observar su impacto sobre la ordenación de las alternativas. Este tipo de AS se ha implementado en el sistema de forma que al modificar alguno de los parámetros el sistema automáticamente recalcula las utilidades mínimas, medias y máximas de las distintas alternativas, obteniendo de nuevo la ordenación.

Otro tipo de AS consiste en calcular los intervalos de estabilidad de los pesos de objetivos en la jerarquía, que son aquellos donde pueden variar los pesos sin que afecten a la actual ordenación de las alternativas, ver Figura 12. Si en un determinado momento se tiene una ordenación de las alternativas y elegimos un objetivo cualquiera de la jerarquía, el intervalo de estabilidad del peso de este objetivo nos indica que si modificamos este valor y el nuevo valor está dentro del intervalo de estabilidad la anterior ordenación no variará, mientras que si el nuevo valor del peso no pertenece al intervalo obtendremos una nueva ordenación distinta a la anterior.

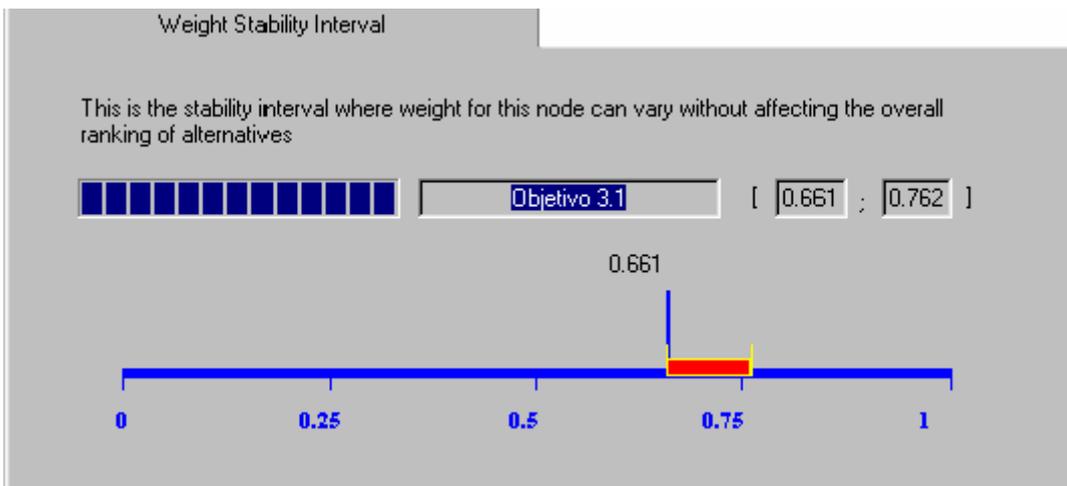


Figura 12. Intervalo de estabilidad del peso del Objetivo 3.1

Por otro lado, el sistema también determina las alternativas no dominadas y las potencialmente óptimas (Ríos Insua, 1990; Ríos Insua y French, 1991). La idea subyacente de la obtención de estas alternativas es la explotación de toda la información imprecisa de la que disponemos (consecuencias o impactos de las alternativas, utilidades individuales en los atributos y pesos de los atributos sobre la decisión) para ayudar al decisor a reducir el conjunto de alternativas de interés. Para su obtención se tendrá que resolver una serie de problemas de optimización que o bien son lineales o bien se pueden descomponer en otros que sí lo sean (Mateos et al., 2003).

Finalmente, se han diseñado técnicas de simulación para el análisis de sensibilidad. Este tipo de AS, ver Butler et al. (1997) y Dyer et al. (1998), utiliza simulación Montecarlo y permite cambios simultáneos en los pesos, generando resultados que pueden ser fácilmente analizados de una forma estadística para proporcionar un mayor entendimiento de las recomendaciones del modelo multiatributo.

Se han implementado tres clases de simulación:

- *Generación aleatoria de pesos*, que implica que no hay conocimiento sobre la importancia relativa de los atributos. Por lo tanto, los pesos de los atributos sobre la decisión se generan de forma totalmente aleatoria.
- *Ordenación total o parcial de los atributos*, que impone restricciones substanciales sobre el dominio de los pesos que son consistentes con los juicios del decisor sobre la importancia de los atributos, lo cual provoca resultados más significativos. En este caso, los pesos se generan aleatoriamente y se asignan a los distintos atributos teniendo en cuenta su orden total o parcial de importancia.
- *Distribuciones de respuesta*, que reconoce que el procedimiento de cálculo de pesos está sujeto a variación, asignándose los pesos de los atributos aleatoriamente teniendo en cuenta los intervalos de pesos proporcionados por el decisor en los métodos de asignación.

El sistema calcula varias medidas estadísticas de las ordenaciones de las alternativas como la moda, el mínimo, el máximo, la media, la desviación estándar y los percentiles. Esta información se le presenta al decisor a través de diagramas de cajas múltiple y mediante una tabla, ver Figuras 13 y 14, y puede ser útil para descartar algunas de las alternativas bajo estudio.

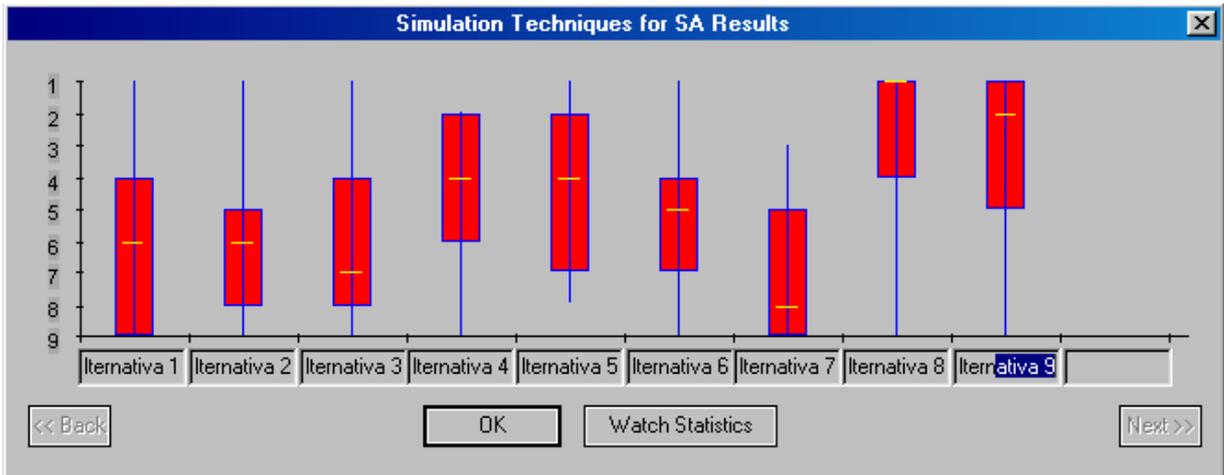


Figura 13. Diagrama de cajas múltiple resultante de la simulación

	Mode	Min.	25th percentile	50th percentile	75th percentile	Max.	Mean	Std. Deviation
Alternativa 1	9	1	4.000	6.000	9.000	9	6.234	2.456
Alternativa 2	8	1	5.000	6.000	8.000	9	6.038	1.793
Alternativa 3	9	1	4.000	7.000	8.000	9	6.261	2.390
Alternativa 4	2	2	2.000	4.000	6.000	9	4.330	2.030
Alternativa 5	7	1	2.000	4.000	7.000	8	4.509	2.092
Alternativa 6	5	1	4.000	5.000	7.000	9	5.506	2.139
Alternativa 7	9	3	5.000	8.000	9.000	9	6.786	2.179
Alternativa 8	1	1	1.000	1.000	4.000	9	2.362	1.817
Alternativa 9	1	1	1.000	2.000	5.000	9	2.974	2.128

Figura 14. Medidas estadísticas asociadas al diagrama de cajas de la Figura 13

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

- La primera conclusión, y más importante, es que el SAD facilita las tareas en la toma de decisiones en situaciones complejas, en las que se necesita un análisis formal, ya que se pueden superar nuestras capacidades cognoscitivas por su complejidad e incertidumbre inherentes. Prueba de ello ha sido su aplicación en los problemas de decisión complejos “Restauración de ecosistemas acuáticos contaminados por residuos radiactivos” y “Análisis y selección de las alternativas para la disposición de los excedentes de plutonio para prevenir la proliferación de armamento nuclear”, ver Ríos Insua et al. (2000), Jiménez (2002) y Jiménez et al. (2003).
- La incertidumbre sobre las consecuencias de las alternativas, así como la imprecisión en la asignación de utilidades individuales y pesos, nos permite obtener más información tanto en la evaluación de alternativas como en el posterior AS, haciendo más cómodos estos métodos de asignación y acercándonos a los problemas de decisión reales en los que suele haber incertidumbre.
- La utilización del modelo multiatributo en utilidad aditivo nos ha permitido enfrentarnos a problemas de optimización lineales o fácilmente transformables en lineales en alguno de los AS desarrollados (alternativas no dominadas y potencialmente óptimas e intervalos de estabilidad de los pesos).
- El Análisis de Sensibilidad juega un papel fundamental dentro del ciclo iterativo en que consiste el AD. Por ello, se ha hecho énfasis en esta etapa del AD, dando lugar a los distintos tipos de AS descritos en este trabajo.

Líneas futuras de investigación:

- Alternativas con consecuencias ausentes. Se propone el estudio de los casos en los que alguna de las alternativas bajo consideración no proporcione ningún valor para alguno de los atributos del sistema. ¿Qué ocurre con el peso asociado a este atributo en la evaluación de esa alternativa?
- Posibilidad de utilizar otras distribuciones de probabilidad para representar las incertidumbre de las consecuencias de las alternativas bajo consideración, además de la distribución uniforme, considerada actualmente.
- Estudio de las condiciones de independencia entre los atributos del sistema para la utilización de otros modelos de utilidad multiatributo, como el multiplicativo, el multilineal, así como combinaciones parciales de ellos.
- Desarrollo de nuevos tipos de AS debido al papel fundamental que juega esta etapa en el ciclo del AD.
- Inclusión del factor tiempo en el sistema, ya que las consecuencias de las distintas alternativas pueden abarcar varios períodos de tiempo. Para ello, se incluirán distintas jerarquías de objetivos y factores de descuento.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado con el proyecto de la Comunidad Autónoma de Madrid 07T/0027/2000, el proyecto del Ministerio de Ciencia y Tecnología DPI2001-3731 y los proyectos de la Comisión Europea FIP-CT96-0036 y ERBIC15-CT98-0203-COMETES.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Brownlow, S.A. y Watson, S.R. (1987), "Structuring Multi-attribute Value Hierarchies", *Journal of the Operational Research Society* 38, 309-317.
- Butler, J., Jia, J. y Dyer, J. (1997), "Simulation Techniques for the Sensitivity Analysis of Multi-Criteria Decision Models", *European Journal of Operational Research* 103, 531-546.
- Clemen, R.T. (1986), *Making Hard Decisions. An Introduction to Decision Analysis*, PWS-KENT Publishing Company, Boston.
- Dyer, J.S., Edmunds, T., Butler, J.C. y Jia, J. (1998), "A Multi-Attribute Utility Analysis of Alternatives for the Disposition of Surplus Weapons-Grade Plutonium", *Operations Research* 46, 6, 759-762.
- Jiménez, A. (2002), *Un Sistema de Ayuda a la Decisión Multiatributo con Asignaciones Imprecisas*, Tesis Doctoral. Dpto. de Inteligencia Artificial, Facultad de Informática, Universidad Politécnica de Madrid.
- Jiménez, A., Ríos-Insua, S. y Mateos, A. (2003), "A Decisión Support System for Multiattribute Utility Evaluation based on Imprecise Assignments", *Decision Support Systems* (aparecerá).
- Keeney, R.L. y Raiffa, H. (1976), *Decision with Multiple Objectives: Preferences and Value-Tradeoffs*, Wiley, New York.
- Kirkwood, C.W. (1997), *Strategic Decision Making. Multiobjective Decision Analysis with Spreadsheet*, Duxbury Press, Belmont.
- MacCrimmon, K.R. (1969), *Improving the System Design and Evaluation Process by the Use of Trade-offs Information: an Application to Northeast Corridor Transportation Planning*. RM-5877-DOT. The Rand Corporation, Santa Mónica, California.
- Manheim, M.L. y Hall, F. (1967), "Abstract Representation of Goals: a Method for Making Decision in Complex Problems in Transportation: A Service", *Proceedings of Sesquicentennial Forum*, New York Academy of Sciences-American Society of Mechanical Engineers, New York.
- Mateos, A., Jiménez, A. y Ríos-Insua, S. (2003), "Solving Dominance and Potential Optimality in Imprecise Multi-Attribute Additive Problems", *Journal of Reliability Engineering and System Safety* 79, 2, pp. 253-262.
- Raiffa, H. (1982), *The Art and Science of Negotiation*, Harvard University Press: Cambridge, Mass.
- Ríos Insua, D. (1990), *Sensitivity Analysis Multiobjective Decision Making*, LNEMS 347, Springer. Berlín.
- Ríos Insua, D. y French, S. (1991), "A Framework for Sensitivity Analysis in Discrete Multi-Objective Decision-Making", *European Journal of Operational Research* 54, 176-190.
- Ríos Insua, D., Gallego, E., Mateos, A. y Ríos-Insua, S. (2000), "MOIRA: A Decision Support System for Decision Making on Aquatic Ecosystem Contaminated by Radioactive Fallout", *Annals of Operations Research* 95, 341-364.
- Stewart, T.J. (1996), "Robustness of Additive Value Function Method in MCDM", *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis* 5, 301-309.