

“ECUALIZADOR”: UN MÉTODO INTEGRAL PARA LA DECISIÓN CON MÚLTIPLES OBJETIVOS

Patricia Jaramillo Álvarez¹, Joaquín Andreu Álvarez¹ y Ricardo Smith Quintero²

Resumen:

Se presenta un sistema soporte para la toma de decisión multiobjetivo en un espacio continuo, en el que se integraron métodos clásicos y una metodología que se ha denominado "ecualizador" por las facultades regularizadoras entre intereses respecto a objetivos. Esta permite que el decisor, partiendo desde una solución inicial, "navegue" dentro del espacio de los objetivos. Mediante aprendizaje sobre posibles intercambios entre objetivos y limitaciones del espacio factible, va deduciendo sus verdaderas preferencias hasta que el proceso converja en una solución completamente satisfactoria para el decisor. Esta metodología tiene especial aplicación en la gestión de recursos naturales, en especial los recursos hídricos. Se presenta una aplicación del sistema soporte desarrollado en el caso de la gestión de agua para riego en la cuenca del Guadalquivir.

Palabras clave: Objetivos múltiples, recursos hídricos, sistemas de ayuda a la decisión, cuenca del Guadalquivir.

INTRODUCCIÓN

La función básica de la planificación de los recursos naturales, en particular del agua, es su gestión y asignación en el espacio y en el tiempo, considerando un conjunto de objetivos que se aspiran a alcanzar. Si los objetivos están en competencia, las personas encargadas de tomar las decisiones deben ser conscientes de que cualquiera que sea la decisión que tomen, no podrán lograr al máximo un objetivo sin perjudicar alguno de los otros. Ellas deben tomar una decisión en la que, integrando todas las expectativas, obtengan un escenario que satisfaga sus objetivos. Esta tarea no es fácil, más aun si los objetivos que se persiguen y las opciones disponibles son numerosas. La capacidad de la mente humana para elaborar juicios de valor sobre un conjunto de múltiples alternativas es limitada. Es por eso que requiere de herramientas que le faciliten definir todos los elementos y organizar la información tal que pueda ser más fácilmente evaluada a la

hora de decidir. El proceso de toma de decisiones requiere asignar prioridades a los objetivos, evaluar variables, permitir intercambios entre objetivos e integrar múltiples puntos de vista.

Las metodologías desarrolladas para el proceso de análisis multiobjetivo se han basado en soportes teóricos muy sólidos, que en la práctica han demostrado no ser tan útiles porque requieren de parámetros subjetivos difícilmente cuantificables, se basan en conceptos difíciles de entender por el decisor (lo que hace indispensable la asistencia de un analista), producen resultados no coherentes con las preferencias del decisor y presentan gran diversidad en los resultados con el uso de diferentes métodos. Esto ha causado limitaciones para su utilización en la solución de problemas prácticos. Por otra parte, a principios de los 90 se da el auge de los sistemas soporte a la toma de decisiones (SSD). Los recursos que pueden aportar a la ciencia de la decisión son ilimitados: capacidades de gestión de da-

¹Departamento de Ingeniería Hidráulica y M. Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España. telf:+34 96 387 7614; e-mail: ximoand@upv.es

²Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.telf: 57-4-425522;

e-mail: gpjarami@perseus.unalmed.edu.co

Artículo recibido el 24 de enero de 2000, recibido en forma revisada el 9 de noviembre de 2001 y aceptado para su publicación el 15 de enero de 2002. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

tos, modelos matemáticos, capacidades gráficas, información simultánea y capacidades interactivas para ayudar al decisor a sintetizar y analizar las interrelaciones de los elementos implicados en problemas complejos de decisión. Algunos sistemas soporte desarrollados para el análisis multiobjetivo en diferentes campos son: ARIADNE (White y otros, 1984), ELECTRE DSS (Goicoechea y Li, 1989), EXPERT CHOICE (Forman, 1985 y Selly y Forman, 1986), entre otros. El sistema MATS-PC (Brown y otros, 1986) fue diseñado para usarse en actividades de gestión de recursos hidráulicos del U.S. Bureau of Reclamation y usa la teoría de utilidad multiobjetivo. Gallego y otros (1996) desarrollaron un sistema soporte para ordenar por prioridad de ejecución, proyectos de gestión y desarrollo de recursos hidráulicos usando métodos discretos multicriterio.

GENERALIDADES DEL ANÁLISIS MULTI OBJETIVO

En la gestión de los recursos hídricos se debe identificar inicialmente el sistema a ser evaluado y los objetivos relevantes, usar luego modelos para evaluar posibles alternativas y por ultimo seleccionar la mejor alternativa a ser implantada. Suponiendo que el paso inicial es posible, se acostumbra expresar matemáticamente el problema en cuestión de la siguiente manera general:

$$\text{Maximizar } \mathbf{Z}(\mathbf{x}) = (Z_1(\mathbf{x}), Z_2(\mathbf{x}), \dots, Z_q(\mathbf{x})) \quad (1)$$

$$\text{sujeto a: } g_k(\mathbf{x}) \leq 0 \quad k = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Donde Z es el vector de las q funciones objetivo Z_i , x es el vector de las n variables de decisión y las funciones g_k son m restricciones que definen el espacio factible S , impuestas generalmente por factores como el medio ambiente, algunos procesos físicos, la cantidad de recursos económicos y materiales, etc. Generalmente no existe una solución x que maximice simultáneamente todos los objetivos y que esté dentro de la región factible. Una salida viable al problema es transformar la búsqueda de la solución "óptima" en la búsqueda de una solución "satisfactoria". Esta solución debe ser eficiente aprovechando al máximo los recursos, es decir, si se desea mejorar en algún objetivo, esto sólo podría hacerse a expensas de otro. Si el espacio de decisión es continuo, existen infinitas soluciones eficientes, denominadas también no dominadas o no

inferiores. Es mediante el juicio del decisor que puede escogerse una de ellas como solución al problema. Por ejemplo, la figura 1 representa el espacio factible en el caso de que sean dos los objetivos considerados. El segmento de curva AB , denominado frontera de Pareto, integra todas las soluciones eficientes, Z^{\max} es el vector compuesto por todos los óptimos individuales de cada objetivo y Z^{\min} es el vector compuesto por los peores valores de los objetivos en esa frontera. La solución no dominada está representada por el segmento de curva AB y el decisor debe escoger de ese conjunto la solución a ser implementada.

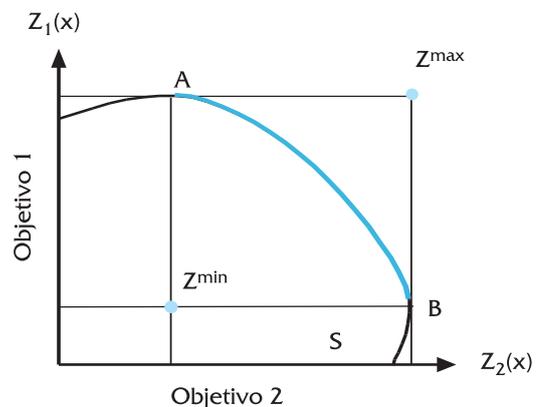


Figura 1. Espacio de decisión para dos objetivos

Goicoechea y otros (1982), Cohon (1978), Smith y otros (1993), y Bogardi y Nachtnebel (1994) han recopilado y clasificado los métodos de análisis multiobjetivo más importantes hasta ahora desarrollados y su uso específico en la planificación de los recursos naturales. Los métodos pueden clasificarse en tres grupos: métodos que generan un conjunto de alternativas no dominadas (sin involucrar las preferencias del decisor), métodos que articulan las preferencias del decisor a priori y métodos que articulan progresivamente las preferencias del decisor. El primer grupo obtiene mecánicamente un conjunto de alternativas no dominadas para que el decisor seleccione luego por otros métodos una de ellas. Por ejemplo, el método de los factores ponderantes (Zadeh, 1963) obtiene un conjunto de alternativas no dominadas optimizando la suma ponderada de los objetivos con diferentes posibles combinaciones de factores ponderantes, y el método de las restricciones (Haimes y otros, 1971) genera un conjunto de alternativas no dominadas obteniendo el valor máximo que puede alcanzar un objetivo variando paramétricamente los logros posibles en los otros objetivos. Estos métodos son poco eficientes porque muchas de las exploraciones que hacen son infructuosas, en el sentido de que cu-

brirán espacios de decisión que definitivamente no son de interés para el decisor o puede suceder que no cubran el subespacio que realmente le interesa al decisor.

En el segundo grupo se destacan los métodos de la programación de compromiso (Zeleny, 1973), la programación por metas (Charnes y Cooper, 1963) y la función de utilidad multiobjetivo (basado en los conceptos evaluados por von Neumann y Morgenstern, 1947; ampliados por Savage, 1954, y Luce y Raiffa, 1957). La programación de compromiso minimiza la suma de las distancias independientes de los objetivos a sus óptimos, ponderada por factores que dependen de las preferencias del decisor. La programación por metas es semejante al anterior método pero considera, en vez del punto ideal, una meta particular del decisor, la cual puede ser excedida o no. Si la métrica usada es baja, estos métodos suelen ofrecer soluciones muy desequilibradas, con grandes logros para ciertos objetivos y pequeños logros para otros. El método de la función de utilidad multiobjetivo supone que el decisor es capaz de identificar la función de utilidad de cada objetivo en forma independiente y el problema se reduce a maximizar el vector de las utilidades. El método resuelve el problema integrando en una función todas las funciones de utilidad independientes, afectada por parámetros que dependen de las preferencias del decisor.

El tercer grupo de métodos obtiene la “mejor solución” articulando progresivamente información de los decisores durante el proceso. Se destaca el método de la valoración sobre las tasas de intercambio (Haines y Hall, 1974) que analiza los objetivos por pares, proponiendo para ellos intercambios eficientes, matemáticamente posibles, obtenidos mecánicamente y evaluando que tan satisfactorios son para el decisor mediante una función de valoración. Busca así los intercambios entre objetivos más satisfactorios para el decisor y halla la solución que los cumple simultáneamente. Este método exige que el decisor sea absolutamente coherente en sus apreciaciones sobre intercambios entre objetivos, aunque en la realidad es difícil que se presente esta situación. Requiere, además, que la función de valoración proporcionada por el decisor sea monótona creciente y pase por el punto cero y debido a esto, con frecuencia, el método falla. Otro método importante es el STEM (Benayoun y otros, 1971), que ofrece una solución inicial por el método de programación de compromiso con métrica infinita. El decisor va expresando los objetivos con los que no está satisfecho y los intercambios que

está dispuesto a aceptar empeorando otros objetivos.

ARTICULACIÓN DE LAS PREFERENCIAS DEL DECISOR EN LOS MÉTODOS MULTI OBJETIVO

Explicar cómo la mente humana elabora juicios sobre las posibles consecuencias de sus decisiones aún es un terreno incierto para la ciencia. Es también difícil aceptar que sensibilidades hacia ciertos escenarios posibles puedan expresarse por números indirectos que representen las preferencias relativas.

En los métodos multiobjetivo existen muy diversas maneras de obtener y representar las preferencias del decisor. Por lo general éstas se expresan numéricamente según el método que se utilice. Las más frecuentemente usadas son: los factores o pesos de importancia relativa, las funciones de utilidad, las metas y los niveles mínimos aceptados.

Los pesos de importancia relativa son los parámetros de preferencias más usados por las diferentes técnicas multiobjetivo. Pero presentan graves problemas ya que hay dificultad práctica en darle un valor numérico, se asumen como tasas constantes de intercambios entre objetivos, independientes del nivel de logro de los objetivos, y las técnicas que lo usan asumen que los pesos son un valor estático. Es decir, el decisor debe definirlos al principio del proceso sin un aprendizaje previo de las limitaciones ni los potenciales del sistema que se evalúa. Además, para diferentes combinaciones de pesos, puede obtenerse la misma solución. Esto hace que la técnica en realidad sea contraintuitiva, porque no hay una correlación positiva tal que incrementando el peso para algún objetivo y disminuyéndolo para el otro, haya una correspondiente mejora y un empeoramiento en los valores de la solución respectiva. Suele ocurrir que los resultados obtenidos para una combinación de pesos sorprendan enormemente al decisor.

Respecto a las funciones de utilidad, para que el usuario defina la función de utilidad de un solo objetivo debe tener la capacidad de analizar el objetivo independientemente de los otros, es decir, no importa cuál será el nivel alcanzado por los otros objetivos para que su función sea válida. La teoría de utilidad asume que el decisor tiene claras y consistentes las preferencias en la parte inicial del proceso de decisión y las funciones integradoras sim-

plifican excesivamente las interrelaciones entre objetivos. Además, es muy difícil hacer un análisis de sensibilidad debido a la gran cantidad de parámetros involucrados.

Las metas son los niveles de los objetivos que el decisor desearía obtener, consciente de que no puede obtener los óptimos simultáneamente. Los niveles mínimos aceptables son los niveles de los objetivos por debajo de los cuales no hay ninguna solución aceptable para el decisor. Estos niveles son muy útiles porque son intuitivos, es decir, para el decisor siempre le será claro su significado porque se dan en las mismas unidades de los objetivos y, por lo general, si los cambia, cambiará la solución en correlación positiva con ese cambio. Además, limitan el rango de búsqueda reduciendo complejidad en el proceso de selección de alternativas. A pesar de estas ventajas, en la literatura es difícil encontrar modelos de estimación de metas o mínimos aceptables.

ECUALIZADOR CONTINUO

Un estudio detallado de las metodologías disponibles hasta el momento hizo evidente la necesidad de desarrollar tecnologías que conduzcan al decisor, sin decidir por él, y le suministren información suficiente sobre las posibles consecuencias de sus acciones, ayudándole a entender las relaciones en el espacio de decisión del problema que se le presenta: limitaciones, factibilidades, intercambios eficientes etc., para que el proceso converja en una buena decisión. Se propone entonces un sistema soporte a la decisión que guíe al decisor (y no necesariamente a un analista) en la búsqueda de la solución satisfactoria. El sistema desarrollado presenta una interfaz amigable y fácil de usar, permite analizar problemas frecuentes en la planificación y gestión de recursos naturales de diferentes tipos, soporta un alto número de objetivos (lineales o no lineales) y variables de decisión. El sistema posee capacidades gráficas para suministrar información muy completa al decisor sobre las consecuencias de sus posibles acciones. Integra las metodologías clásicas mencionadas anteriormente y otra desarrollada en el estudio. El sistema se basa en ideas que en otro tiempo no se explotaron lo suficiente por las limitaciones de cálculo, gráficas o de almacenamiento de datos, y se denominó "ecualizador" por las facultades regularizadoras entre objetivos.

El método ecualizador puede obtener un conjunto de soluciones no dominadas o una sola de

ellas. El modelo se basa en el concepto de "comportamiento complaciente" (March y Simon, 1958 y Wierzbicki, 1982), el cual trata de mejorar el objetivo que según el decisor, se encuentra en el peor nivel. El método no se basa explícitamente en una sola técnica, sino que trata de incorporar las ventajas de algunas de ellas, adicionándoles características que solventan algunos de sus defectos. El procedimiento da progresivamente información gráfica y numérica al decisor con base en las propuestas de éste. Los pasos a seguir por el modelo básico del ecualizador son los siguientes:

Paso 1: El SSD calcula una solución inicial por el método y pesos que el usuario elija dentro de un menú. Los métodos disponibles son: programación de compromiso con las métricas uno, dos e infinito y programación por metas. La solución inicial sólo es un punto de referencia para comenzar el proceso de mejora de esa solución. El modelo le muestra al usuario la solución por medio de una gráfica en la que presenta barras verticales desplazables, una por cada objetivo, que describen para cada objetivo el valor óptimo, el peor valor en la curva de Pareto y el valor de la alternativa eficiente propuesta por el SSD. Todas las barras tienen la misma longitud expresada en valores normalizados de $Z_i'(x)$ lo cual permite comparar los objetivos entre sí. Cada barra tiene una función lineal de transformación al valor real correspondiente $Z_i(x)$. El factor normalizador usado es la diferencia entre el valor óptimo y el peor valor de la curva de Pareto de cada objetivo.

Paso 2: Si el decisor está totalmente satisfecho con la alternativa propuesta la registra en memoria y termina el proceso. En caso contrario, si al usuario le parece interesante la alternativa pero desea continuar con el proceso de búsqueda, la registra para análisis posteriores. La alternativa registrada se representa en una gráfica adicional a la del ecualizador.

Paso 3: Para continuar con el proceso, el usuario puede elegir un objetivo que desee mejorar a expensas de algún otro. Para ello, debe desplazar la barra correspondiente a este último hasta el nivel que esté dispuesto a sacrificar. El programa inmediatamente estima en cuánto le es posible aumentar en el objetivo elegido para mejorar, y ofrece, representada en las mismas barras, la solución eficiente factible que cumple las nuevas condiciones. El programa presenta la solución resultante del siguiente problema de programación matemática:

$$\text{Maximizar } Z_k(\mathbf{x}) \quad (4)$$

$$\text{sujeto a: } Z_j(\mathbf{x}) \geq \epsilon_j, \quad \forall j \neq k, \quad j=1, \dots, q \quad (5)$$

$$\mathbf{x} \in S \quad (6)$$

donde k es el objetivo elegido para mejorar y ϵ_j representa los valores de Z_j correspondientes a los niveles marcados en las barras desplazables de cada uno de los objetivos j . En la figura 2 se esquematiza el proceso de intercambio entre alternativas obtenidas en dos iteraciones continuas, una vez el decisor informa al programa que prefiere mejorar el objetivo j a expensas del objetivo $j-1$ en una cantidad $\Delta Z'_{j-1}$.

Paso 4: Si al usuario le parece interesante la alternativa, puede registrarla y el programa la guarda en memoria. El usuario puede continuar su búsqueda siguiendo de nuevo al paso 3 e ir registrando las que le parezcan interesantes. Si considera que el conjunto discreto de alternativas no dominadas registrado hasta el momento es suficiente sigue al paso 5.

Paso 5: El usuario visualiza en la gráfica adicional al equalizador, el conjunto discreto registrado y evalúa si algunas de las alternativas anteriormente registradas ya no le son interesantes y las elimina del registro. Este método puede conducirle a una única solución como decisión definitiva o a un conjunto reducido del anterior. El proceso equalizador termina, y si el conjunto registrado tiene varias alternativas, éstas podrán ser evaluadas luego por algún método discreto, como por ejemplo los métodos ELECTRE. Este ya intervendrá sobre la clasificación de un conjunto reducido y concienzudamente obtenido por el decisor y le refinarán sus decisiones para la elección de una sola alternativa.

El decisor puede visualizar en cualquier momento del proceso los valores de las variables de decisión de la solución actual del equalizador. Si decide que desea mejorar algún valor de una variable el programa le permite adicionar nuevas restricciones sobre alguna de ellas, condicionándola a un límite mínimo o a un límite máximo para las próximas iteraciones o puede incluso estabilizarla en el valor actual. El programa estima inmediatamente la solución no dominada que se ajuste a las nuevas condiciones y actualiza el equalizador. La nueva condición puede removerse en cualquier momento del proceso. Lo interesante del método son las capacidades de información y de análisis que le da la interfaz gráfica, pues ésta le permite navegar rápi-

damente y en forma continua por todo el espacio factible.

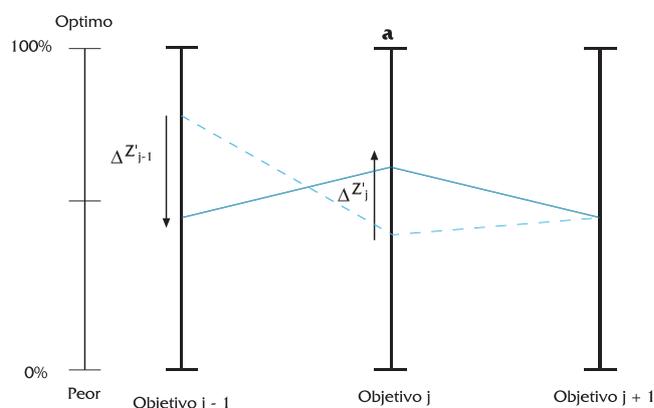


Figura 2. Esquema del proceso equalizador.

El usuario puede, en cualquier momento del proceso, realizar los siguientes pasos opcionales:

- Conocer la tasa de intercambio de la solución actual, correspondiente a lo ganado en el objetivo elegido para mejorar, con relación a lo perdido en el objetivo empeorado. Describe, además, los cambios en los otros objetivos respecto a la solución anterior.
- Estabilizar temporalmente un objetivo en un valor que permanecerá constante en las siguientes iteraciones o puede remover un objetivo del análisis hasta que él lo desee. Esto da como resultado una solución eficiente sólo con respecto a los objetivos activos, por lo que este tipo de soluciones no se permite registrar como definitivas en el programa, pero ayuda al decisor a entender relaciones entre los objetivos y evaluar que tan sensibles son los resultados a uno o varios de ellos.
- El método permite analizar las dependencias con respecto a la solución inicial dada por el programa. Si en cualquier momento del proceso se desea generar una solución obtenida con otros pesos y métodos diferentes al inicial, el modelo se lo permite y le proporcionará en forma similar la alternativa correspondiente. Los métodos pueden complementarse más que “competir” en cuál es el mejor.
- Permite disminuir el rango de búsqueda en el resto del proceso. Esto se hace imponiendo gráficamente, restricciones sobre nuevos peores valores posibles para algunos de los objetivos mediante un menú disponible. El vector de los nuevos peores valores posibles Z^{\min} desplazará el punto ideal a

$Z_i^{\max'}$, en el que se basarán todos los cálculos siguientes. El nuevo punto ideal se calcula optimizando cada objetivo independientemente teniendo en cuenta todas las condiciones sobre los peores valores de los objetivos adicionadas. Los nuevos rangos de búsqueda se describen gráficamente para que el usuario considere los valores máximos a los que podría llegar ahora, aunque no simultáneamente. De esta forma, el rango de búsqueda para cada objetivo i , $(Z_i^{\max} - Z_i^{\min})$ se transformará a $(Z_i^{\max'} - Z_i^{\min'})$. El usuario puede remover en cualquier momento del proceso alguna de las restricciones impuestas de este modo.

- Volver a un paso anterior en caso de considerar desacertado el último movimiento.

- En cualquier momento puede observarse, en la forma que elija el decisor, gráficas relativas a los valores de las variables y a los objetivos, en caso de implantar la alternativa que se presenta actualmente en el equalizador o de cualquier alternativa registrada.

En la figura 3, se describe el diagrama de flujo del proceso básico del modelo equalizador para problemas con variables continuas.

Relación del equalizador con otros métodos

El equalizador integra algunas características de varios métodos clásicos. Ellos son:

- STEM

El STEM fue desarrollado en la década de los 70's, cuando la disponibilidad de tecnologías que soportaran alto costo computacional era escasa y no estaban disponibles para el encargado de la toma de decisiones. Existían limitaciones en capacidades gráficas, velocidad de cálculo y almacenamiento de datos, por lo que el método no fue muy considerado y se encuentran pocas referencias a él en la literatura científica. El equalizador rescata la filosofía principal de este método, aunque, además de aprovecharse de las nuevas tecnologías, presenta importantes diferencias: El STEM fue desarrollado para funciones objetivo lineales, el equalizador es útil para todo tipo de funciones objetivo. El STEM usa como método base para las próximas iteraciones la programación de compromiso con métrica infinito. Este método tiene notables ventajas porque obtiene resultados muy equilibrados matemáticamente, pero usa como punto de referencia el ide-

al, que no necesariamente es la meta del decisor. El modelo mejora los objetivos en proporción de su distancia al ideal (matemáticamente obtenido). El equalizador no asume que el punto ideal es el punto meta del decisor. Eso lo hace más flexible porque no está "atado" a la solución ideal, evitando tergiversar lo expresado por el decisor y sesgar las soluciones. En cada interacción con el decisor, el modelo básico del equalizador recibe propuestas factibles pero no necesariamente eficientes y las mejora llevándolas a la frontera eficiente, basado únicamente en lo que en ese momento expone el decisor, sin involucrar el supuesto ideal. Además, el STEM asigna nuevas relajaciones y exige mejoras sobre varios objetivos a la vez. Lo que puede suceder es que se sacrifique inútilmente en algunos objetivos. El equalizador, al intercambiar por pares permite mayor control del decisor sobre los intercambios y facilidad de análisis sobre los nuevos resultados obtenidos, entendiendo el porqué de los nuevos intercambios entre objetivos.

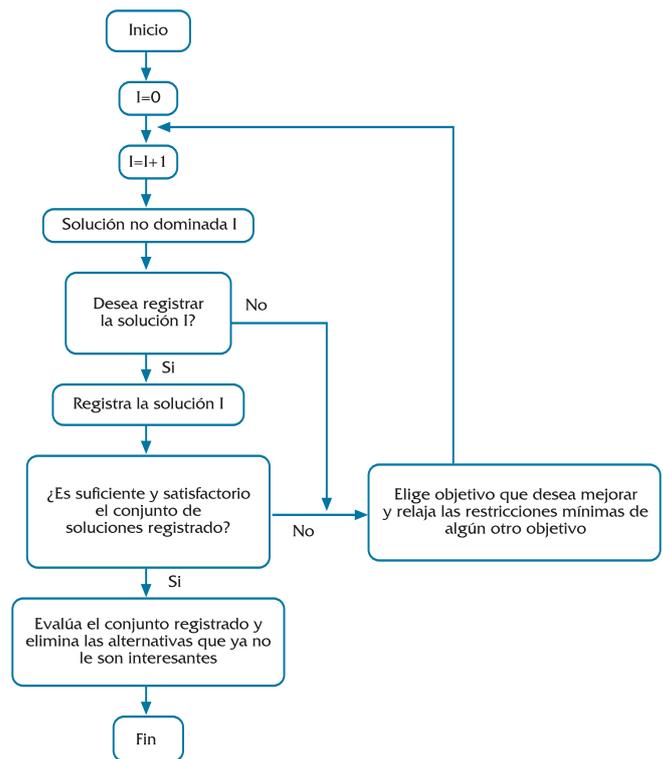


Figura 3. Diagrama de flujo del proceso básico del equalizador

- Método de programación de compromiso y programación por metas:

Estos métodos son utilizados en el equalizador para proporcionar la alternativa inicial al proceso. El equalizador va mejorando esa alternativa acercando al decisor a una plena satisfacción.

- Método de las restricciones:

En este método se basa el modelo principal del ecualizador. Pero, así como el método de las restricciones no involucra al decisor, por lo que aporta muchas soluciones insatisfactorias, o quizá todas, en el ecualizador el decisor tiene plenas facultades para conducir el proceso. Los valores mínimos aceptables no son simples parámetros de discretización, sino que tienen un significado subjetivo sobre la importancia del objetivo para el decisor.

- Valoración sobre las tasas de intercambios

Como ya se ha comentado, el ecualizador informa sobre los intercambios en los objetivos que la alternativa actual hace con la alternativa anteriormente propuesta. El decisor tendrá la facultad de valorarlos y aceptarlos o no. Pero, no se pide una valoración calificativa explícita como lo hace el método de valoración sobre intercambios, lo que en realidad es su gran desventaja. El ecualizador obtiene una función implícita sobre las valoraciones del decisor acerca de intercambios entre objetivos sin exigir que la función de valoración sea monótona creciente, ni minuciosamente consistente.

- Función de utilidad multiobjetivo

A pesar de que en la alternativa inicial el ecualizador asume linealidad de las utilidades, con las posteriores acciones, el decisor va "corrigiendo" ese argumento. El método asume que la valoración de intercambios entre objetivos para un decisor depende del nivel de logro de los objetivos, es decir, la pendiente de la función de utilidad no es constante, por lo tanto la función de utilidad no es lineal.

CASO DE APLICACIÓN: ASIGNACIÓN DE AGUA PARA RIEGO EN LA CUENCA DEL GUADALQUIVIR

Para ilustrar el uso del ecualizador, se discute a continuación un caso de aplicación con el que se pretende establecer la asignación de agua para riego y la adopción de cultivos en la cuenca del Río Guadalquivir, considerando objetivos ambientales, económicos y sociales que desea alcanzar la comunidad de regantes de la cuenca durante una campaña anual. La cuenca del Guadalquivir tiene 57.527 km² de superficie. El río Guadalquivir lleva en la parte baja de su valle un caudal medio anual de 230 m³/s. Sin embargo, a lo largo del año el caudal varía de

440 m³/s, como valor medio en el mes de marzo a 30 m³/s en septiembre, registrados en Alcalá del Río. El uso de la cuenca ha sido históricamente agrícola. Los escasos recursos hídricos en general y la gran variabilidad de la precipitación en el tiempo, han hecho que el control del agua sea de vital importancia en el desarrollo agrícola de la zona.

En la actualidad existen 35 embalses en la cuenca, con 5.593 Hm³ de capacidad global que regulan 1.894 Hm³. En los últimos años, las fuertes sequías han impulsado a que muchos de los cultivos que se cultivaban casi permanentemente se estén reemplazando por otros que exigen menor dotación de agua. Es así como áreas cultivadas con algodón descienden en forma acusada en las campañas con escasa dotación. En el valle del Guadalquivir los olivares han ido reemplazando antiguos cultivos de cereales y cultivos industriales. Estas decisiones se toman con frecuencia sin considerar eficiencia óptima económica, ecológica y social. Las actuaciones respecto al regadío deben encauzarse hacia la mejora de la eficiencia, aplicación técnicamente óptima de riego y adopción de cultivos de acuerdo al agua disponible bajo el concepto de sostenibilidad.

El escenario presentado al inicio de una campaña agrícola es el de una serie de embalses con cierta cantidad de reservas hídricas destinadas para el riego de un conjunto de zonas de demanda. Los regantes tienen que decidir qué sembrar entre una serie de cultivos posibles, en los que predominan los tradicionales. Para formular el problema se asume que cada variable de decisión es la cantidad de agua que se suministra para el riego de determinado cultivo en determinada zona de demanda. Se define cada variable de decisión como x_{ijk} representando la cantidad de agua asignada desde el embalse i para el riego del cultivo k de la zona de demanda j . Como, por experiencia, se conocen las dotaciones d_{jk} requeridas para cada cultivo k en cada zona j , puede conocerse también el área sembrada $a_{jk} = x_{ijk}/d_{jk}$.

Los objetivos considerados fueron: maximizar los beneficios económicos, maximizar el número de empleos generados y priorizar las zonas con mayores problemas de desempleo. Para este último objetivo se usa como indicador la suma de las cantidades de agua asignadas a cada zona de demanda ponderadas por la relación entre el número de parados y su población activa. La unidad correspondiente es pues m³*parados/activa, y la denominaremos “índice de paro”. Las restricciones fueron definidas por los límites en la cantidad de agua dispo-

nible para riego en los embalses, el área de cada zona de demanda y los límites mínimos y máximos de área sembrada con cada cultivo en cada zona de demanda, determinados por los regantes. Simplificando el sistema y agregando los embalses con características y conexiones semejantes, el sistema se reduce a 20 embalses y 36 zonas de demanda (figura 4). Los cultivos considerados fueron: frutales, olivo, tomate, trigo, algodón, cítricos, arroz y alfalfa. Para cada año de planificación se requiere de la asignación de valores a 508 variables y cumplir con 151 restricciones. Para el análisis multiobjetivo se usaron los métodos programación de compromiso con métrica uno, programación por metas, factores ponderantes, el método de las restricciones y el equalizador.

Se ha considerado una situación igual a la del año 1991. No se restringieron las áreas sembradas en determinados cultivos, más que con la obvia restricción del área de la zona de demanda. La cantidad de agua disponible para riego en los embalses y las áreas de las zonas de demanda se sintetizan en la figura 4. Para el método de programación por metas, se usó como meta 273.180 millones de pesetas, 23.968.500 jornales y 164.790.896 en el índice de paro correspondientes al 100%, 80% y 70% de logro respecto al óptimo menos el peor valor de la curva de Pareto para el primer, segundo y tercer objetivo, respectivamente. Por brevedad, se evalúan los resultados únicamente en el espacio de los objetivos. Los resultados permiten observar ciertas debilidades y fortalezas de los métodos clásicos usados.

La optimización de cada objetivo independientemente permite una exploración inicial de las posibilidades anuales, que incluso pueden ser mayores a las expectativas que a priori tendrían los regantes. Pudo observarse que la optimización de cada objetivo plantea escenarios de riegos muy diferentes entre sí. Por ejemplo, para maximizar los beneficios económicos, el tomate es el cultivo que más beneficios aporta. Para el segundo objetivo los fru-

tales son los que más jornales aporta y para el tercer objetivo los frutales y el olivo son cultivos importantes. Lo más probable es que el decisor, al evaluar esos escenarios, no desee ninguno de ellos ya que cada uno le interesa a la luz de un solo objetivo.

Como puede verse en la tabla 1, los resultados encontrados por los métodos programación de compromiso y programación por metas desfavorecen el logro del segundo objetivo, obteniendo logros muy altos para el primer y tercer objetivo. Para el decisor, este resultado puede sorprenderle si expresó que todos los objetivos tenían para él la misma importancia. Si él conoce las bases del método le parecerá comprensible, ya que los métodos minimizan la suma de las distancias ponderadas al punto de referencia sin importar realmente que tan radicales sean los resultados para los objetivos en forma independiente. Cuando las metas son inferiores al punto ideal, los resultados del método de programación de metas presentan características semejantes. Lo que cuenta para el método es que la suma de déficits o excesos ponderados sea mínima, no importa si hay excesos para unos y grandes déficits para otros. Los métodos de los factores ponderantes y el de las restricciones encontraron soluciones no dominadas concentradas en porciones del espacio de decisión, dejando espacios sin ninguna solución que le represente.

Es posible que al decisor, las soluciones encontradas hasta el momento por los métodos que aportan una única alternativa no le convenzan ya que no le dan la oportunidad de compararla con otras alternativas, ni de saber cuánto tuvo que perder en unos objetivos para poder ganar en otros, o qué nueva opción tendría si decide hacer ciertos intercambios. Los conjuntos de alternativas no dominadas generados por el método de los factores ponderantes (figura 5a) y de las restricciones (figura 5b) presentan diversidad de valores en los objetivos, pero quizás no sean representativos, ni posean un número de alternativas adecuado. Es posible que que-

Tabla 1. Resultados del análisis multiobjetivo por los métodos programación de compromiso y programación por metas para el año simulado.

Objetivos	Óptimo	Peor	Programación de Compromiso m=1 Pesos iguales	Programación por metas Pesos iguales
Beneficios (pesetas)	273.180.196.864	45.060.489.216	196.950.884.352	215.502.716.928
Jornales (jornales)	27.119.820	11.363.240	15.891.555	17.206.118
Priorizar zonas (índice de paro)	171.386.208	149.401.792	171.035.024	164.790.896
Logros respecto a (óptimo - peor)				
Beneficios (%)	100,0	0,0	66,6	74,7
Jornales (%)	100,0	0,0	28,7	37,1
Priorizar zonas (%)	100,0	0,0	98,4	70,0

“ECUALIZADOR”: UN MÉTODO INTEGRAL PARA LA DECISIÓN CON MÚLTIPLES OBJETIVOS

den zonas del espacio factible interesantes sin explorar y aporten soluciones en zonas que definitiva-

mente no le interesan al decisor, gastando tiempo computacional e introduciendo ruido en el proceso.

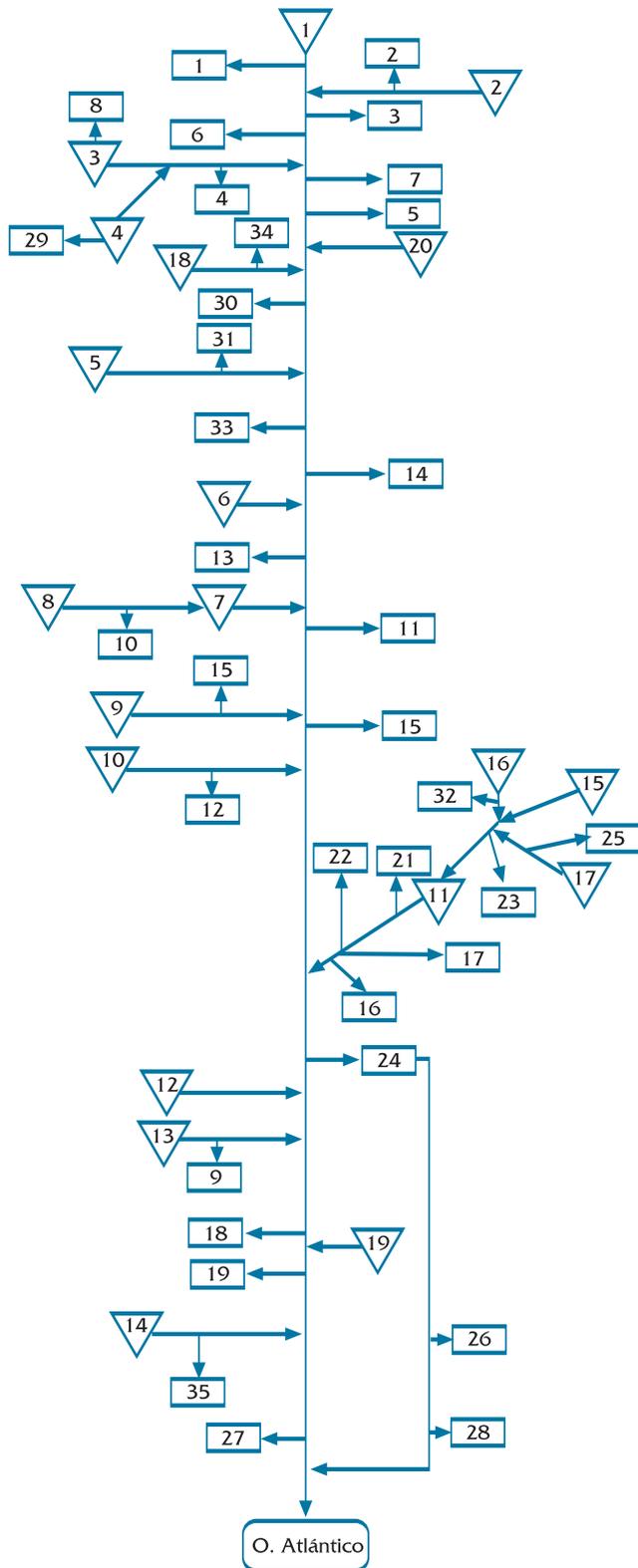


Figura 4. Esquema simplificado de los embalses y zonas de demanda agrícola de la cuenca del Guadalquivir

	EMBALSE	AGUA DISPONIBLE (Hm ³)
1	TRANCO+AGUASCEBAS	29.90
2	NEGRATIN+LA BOLERA+ +S.CLEMENTE	30.87
3	GUADALMENA	36.90
4	GUADALEN-DAÑADOR+ +PANZACOLA	22.43
5	JANDULA	1.77
6	YEGUAS	69.42
7	NAVALLANA	0.00
8	GUADALMELLATO	75.30
9	LA BREÑA+PTE NUEVO	106.87
10	BEMBEZART+RETORT	186.42
11	IZNAJAR	109.86
12	JOSE TORAN+HUESNA	0.00
13	ELPINTADO	97.21
14	ZUFRE+ARACENA	203.54
15	CANALES+QUENTAR	8.60
16	CUBILLAS	1.92
17	BERMEJALES	52.85
18	RUMBLAR	31.86
19	LA PUEBLA	0.00
20	QUIEBRAJANO	7.97
	ZONA DE DEMANDA	AREA (ha)
1	VEGAS ALTAS	2912
2	15R43	2284
3	15R52	4004
4	15R37	4531
5	JANDULLILLA	2000
6	VEGAS MEDIAS	3447
7	VEGAS BAJAS	3840
8	GUADALMENA	2000
9	VIAR	11853
10	GUADALMELLATO	7720
11	FUENTE PALMERA	5260
12	BEMBEZAR	15319
13	SOCIALES1	1200
14	15R35	2289
15	15R24/25	46
16	GENIL MD	2118
17	GENIL MI	5150
18	15R07	2512
19	SOCIALES2	800
20	15R48	2251
21	GENIL-CABRA	13000
22	PRIVADOS GENIL	26001
23	AGREG5	9430
24	VALLE INFERIOR	17694
25	AGREG3	7312
26	15R03	62906
27	15R01	21865
28	15R05	5913
29	15R04	6215
30	GUADALEN	741
31	15R33	9521
32	15R32	9
33	AGREG2	3923
34	15R29	14957
35	AGREG10	5633
36	13R02+13R01	1133

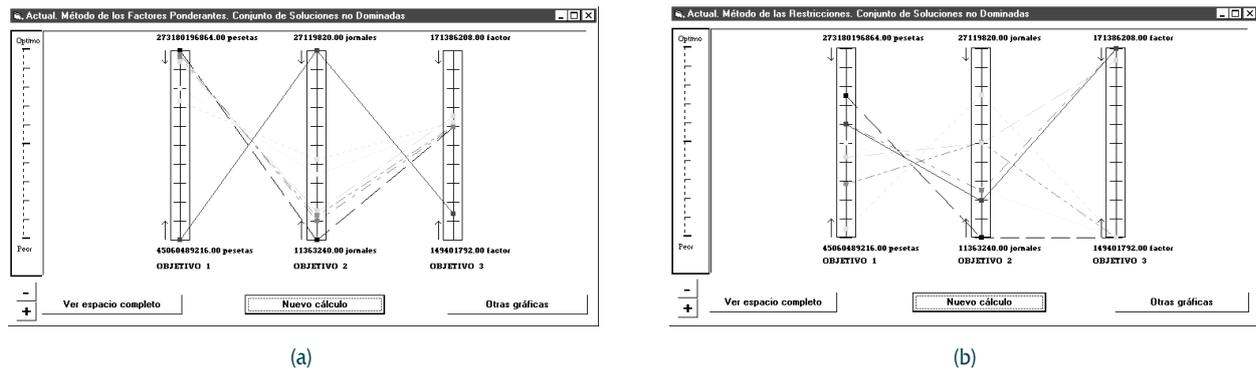


Figura 5. Alternativas no dominadas obtenidas por los métodos factores ponderantes y restricciones.

Entonces, se realiza con el equalizador un proceso que se explica a continuación. El decisor inicia el proceso (figura 6a) con la alternativa correspondiente a la solución de compromiso con métrica 1 que obtendría un logro del 66,6%, 28,7% y 98,4% respecto al valor (óptimo - peor) para el primer, segundo y tercer objetivo respectivamente. Esta solución obtiene 196.950 millones de pesetas, 15.891.553 jornales y 171.035.034 en el índice de paro. El decisor considera que para el segundo objetivo se obtiene un valor muy bajo respecto al máximo que es posible obtener y está dispuesto a disminuir en el tercer objetivo hasta un 50% de logro, correspondiente a 160.393.984 en el índice de paro, para obtener una solución que le proporcione un mejor valor en el segundo objetivo. Puede observarse que, entre las alternativas ofrecidas por el método de las restricciones y el de los factores ponderantes, no se obtuvieron soluciones con logros cercanos a este valor para el tercer objetivo. Ahora el equalizador le ofrecerá una nueva alternativa (figura 6b) que conserva el logro para el primer objetivo, aumenta el del segundo a 48,10% y disminuye el del tercero a 51,47%. Lo que se traduce en obtener 196.950 millones de pesetas de beneficios, requerir de 18.941.448 jornales (aumentando en 3.049.895 jornales respecto a la primera alternativa ofrecida) y 160.716.432 en el índice de paro para el tercer objetivo (disminuyendo en 10.318.602 respecto a la primera alternativa ofrecida). Se supone ahora que al decisor le parece interesante la alternativa, pero al examinar los valores de las variables (figura 6c), observa que el embalse agregado Tranco + Aguascebas no le aporta nada a la demanda Vegas Altas, y entonces exige que una nueva solución le aporte al menos 4.000.000 m³ de agua para regar olivos y 2.000.000 m³ para regar trigo. El equalizador le ofrecerá ahora una alternativa (figura 6d) que respeta estas nuevas exigencias. Aunque, debido al cambio del espacio factible por las nuevas restricciones, la solución cambia un poco en los logros

obtenidos y ofrece una alternativa de 196.950 millones de pesetas, 18.744.481 jornales y 160.450.303 en el índice de paro. El decisor está conforme con esa solución, pero desearía explorar aun más y continúa con su búsqueda. Él desea, por ejemplo, saber que pasaría si disminuye el segundo objetivo al 40% del logro posible para mejorar los beneficios económicos, sin disminuir en el logro obtenido por la alternativa anterior respecto al tercer objetivo. El equalizador le propondrá entonces una nueva alternativa (figura 6e) que proporciona una combinación del 74% para el primer objetivo, 40% para el segundo y 56% para el tercero (214.496 millones, 17.665.872 jornales e índice de paro de 161.765.458). Es posible que la solución actual le satisfaga y la registre. Puede terminar aquí el proceso o continuar verificando intercambios eficientes entre objetivos, e ir registrando las que le parezcan interesantes.

El resultado obtenido por este proceso de aprendizaje y selección es mucho más confiable para el decisor y podrá implementarlo luego con la confianza de que sus deseos reales están reflejados en él. Este es un elemento clave en la comparación de las metodologías. ¿Cómo fue la participación del decisor?, ¿Cuál es la forma de la metodología de captar sus deseos? y ¿Dónde y por qué se termina el proceso? son preguntas que deben hacerse.

VENTAJAS DEL ECUALIZADOR

- El decisor no tiene que dar parámetros explícitos acerca de sus preferencias: las preferencias rara vez están bien establecidas (conflictos, incertidumbres). El proceso debe contribuir a aclararlas, más que a solicitarlas explícitamente.
- El método enfatiza el proceso en el espacio de los objetivos y no en el de las utilidades ni en el

“ECUALIZADOR”: UN MÉTODO INTEGRAL PARA LA DECISION CON MÚLTIPLES OBJETIVOS

de las variables (aunque permite introducirse a este último al poder interferir durante el proceso en sus valores). Esto tiene la ventaja de que la mente humana puede tener claro sus preferencias, pero le es difícil establecerlas con valores cardinales u ordinales como lo exige trabajar sobre el espacio de las utilidades.

- Los métodos que obtienen todo el conjunto de soluciones no dominadas, son muy costosos en tiempo computacional (crece casi exponencialmente con el número de objetivos). Con el equalizador, el usuario puede obtener soluciones no dominadas en la zona que realmente le interesa sin excesivo costo computacional. El proceso puede obtener como resultado una sola alternativa o un conjunto de alternativas no dominadas.

- Se pueden analizar diferentes regiones de la frontera de Pareto. La selección de esas regiones depende de las preferencias del usuario expresadas en términos de valores de los objetivos y puede cambiarlas fácilmente durante el análisis mientras aprende sobre posibles soluciones eficientes.

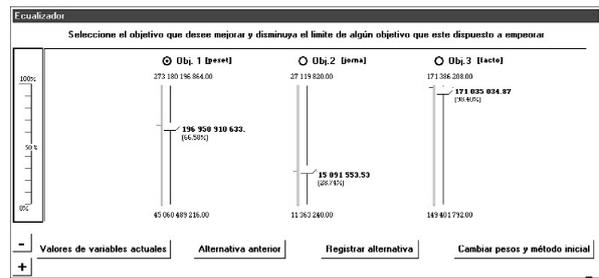
- El método permite ver simultáneamente qué pasa con cada uno de los objetivos al decidir sobre unas condiciones respecto a dos de ellos. Permite establecer dependencias entre objetivos y no hay posibilidad de que haya inconsistencias en las preferencias.

- Los usuarios van entendiendo qué está pasando al interior del proceso. El mismo va construyendo progresivamente la solución y el modelo simultáneamente le va mejorando esa solución garantizándole que sea eficiente.

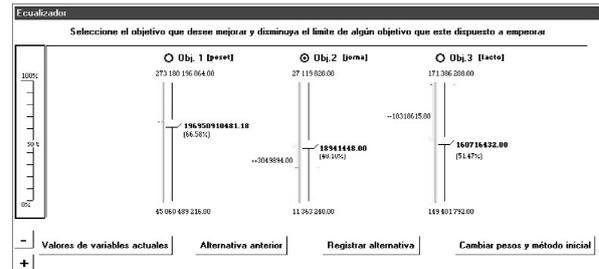
- El proceso, la visualización del mismo, y de las consecuencias de las decisiones se facilita por la interfaz gráfica.

CONCLUSIONES

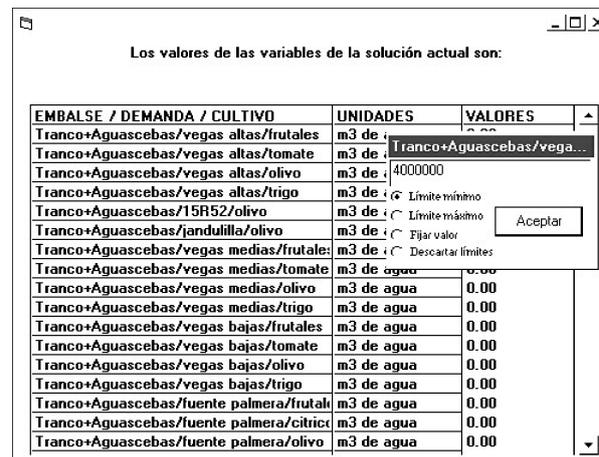
El uso de las técnicas clásicas para la toma de decisiones presenta, con frecuencia, dificultades operacionales. Puede pensarse que es más fácil para el encargado de tomar las decisiones usar herramientas que le guíen, facilitándole buena cantidad de información clara y concisa, expresándose en términos reales como metros cúbicos de agua, hectáreas regadas etc. y permitiéndole análisis rápidos sobre lo que pasaría en caso de proponer nuevos escenarios. Por eso, se diseñó una metodología para



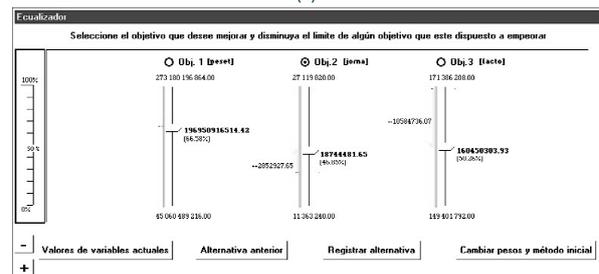
(a)



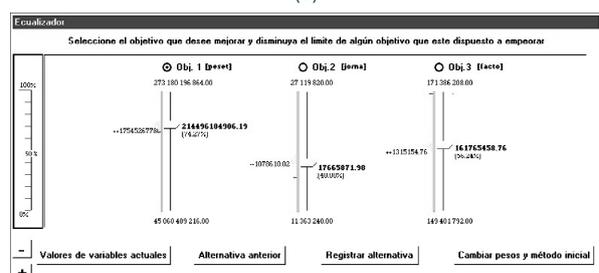
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 6. Secuencia del proceso simulado con el equalizador

la toma de decisiones con múltiples objetivos con la que se solventaron muchos de los problemas típicos de las metodologías hasta ahora conocidas. Esta herramienta, denominada “ecualizador”, usa como marco de trabajo una interfaz amigable al decisor (no necesariamente a un analista pues no necesita saber de técnicas multiobjetivo) directa e inmediata, fácil de entender y manipular, que permite que la idea central de los métodos de articulación progresiva, pase de mera teoría a una metodología que pueda llevarse a la práctica. El ecualizador es capaz de ofrecerle al decisor suficiente información en cada interacción (respecto a objetivos, logros, intercambios, variables), al punto de que sus nuevas decisiones pueden ser fruto de una adquisición muy completa de nueva información. Esto hace que el decisor converja más rápidamente a la solución satisfactoria. Es bajo situaciones de obtención progresiva de gran cantidad de información que los métodos de articulación progresiva de preferencias son útiles realmente.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos presentados se enmarcan en tres proyectos de investigación y desarrollo: el convenio establecido entre la Universidad Politécnica de Valencia y el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX para “la investigación conjunta para el desarrollo de instrumentos de análisis de sistemas de recursos hídricos y su aplicación a la planificación hidrológica”; el convenio de cooperación entre la Universidad de Córdoba, la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía, con la colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia, para “el estudio de los recursos hídricos para uso agrícola en Andalucía”; y el proyecto conjunto de investigación entre la Universidad Politécnica de Valencia y la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia en Medellín para “el desarrollo de un sistema de apoyo a la toma de decisiones sobre recursos naturales considerando objetivos económicos, ambientales y sociales”, financiado por el Programa de Cooperación Científica con Iberoamérica del Ministerio de Educación y Ciencia de España. Se agradece, por tanto, a las mencionadas instituciones el haber posibilitado la realización de las investigaciones y su aplicación práctica a casos reales.

REFERENCIAS

- BOGARDI J. y H. P. NACHTNEBEL (ed.). 1994. Multicriteria decision analysis in water resources management. International Hydrological Programme. UNESCO, Paris.
- BENAYOUN R., J. DE MONTGOLFIER, J. TERNGNY, y O. LARICHEV. 1971. Linear programming with multiple objective functions: STEP Methods (STEM). *Mathematical Programming*, 1(3) 366-375.
- BROWN C., D. STINSON y R. W. GRANT. 1986. Multi-attribute trade-off system: Personal Computer Version User's Manual (MATS-PC). Bureau of Reclamation, Denver, Colorado.
- CHARNES A. y W. W. COOPER. 1963. Deterministic equivalents for optimizing and satisficing under chance constraints. *Operation Research*, 11, 18-39.
- COHON J. L. 1978. Multiobjective programming and planning. Academic Press, New York.
- FORMAN E. H. 1985. Decision Support for the evaluation of the strategic defense initiative. Proceedings of the ORSA/TIMS Conference of the Impacts of microcomputers on operations Research, American Elsevier, New York, New York.
- GALLEGO P., A. L. ALDANA y F. ESTRADA. 1996. Sistema soporte de decisión multicriterio para la priorización y ordenación de proyectos de desarrollo y gestión de recursos hidráulicos. *Ingeniería Civil*, 104, 129-104.
- GOICOECHEA A. y F. LI. 1989. Implementation of ELECTRE method as a decision support system. Report S-9, STATCOM, Inc, Mc Lean, Virginia.
- GOICOECHEA A., D. HANSEN y L. DUCKSTEIN. 1982. Multiobjective decision analysis with engineering and business applications. John Wiley and Sons.
- HAIMES Y. Y. y W. A. HALL. 1977. Sensitivity, responsivity, stability, irreversibility as multiple objectives in civil systems. *Advances in Water Resources*, 1(2).
- HAIMES Y. Y., D. A. WISMER y L. S. LASDON. 1971. On bicriterion formulation of the integrated system identification and system optimization. *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, SMC-1, 196-297.
- JARAMILLO G. 1999. Desarrollo de un sistema soporte a la decisión para la asignación de recursos naturales con satisfacción de múltiples objetivos y múltiples decisores. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. España.
- LUCE R. D. y H. RAIFFA. 1957. Games and decisions. Wiley, New York.
- MARCH J. y H. SIMON. 1958. Organizations. John Wiley and Sons. New York.
- SAVAGE L. J. 1954. The Foundations of Statistics, Dover, New York.
- SELLY, M. A. y E.H. FORMAN. 1986. Expert Choice. Decision Support Software, Inc. 4922 Ellsworth Ave., Pittsburgh, Pennsylvania 15213.

- SMITH R., G. POVEDA, O. MESA, D. VALENCIA y I. DYNER. 1993. Decisiones con múltiples objetivos e incertidumbre. Publ no. 5 del Programa de Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Medellín.
- VON NEUMANN, J. y O. MORGENSTERN. 1947. Theory of games and economic behavior. 2nd Ed., Princeton Univ. Press, Princeton.
- WHITE C. C., A. P. SAGE, S. DOZONO, y W. T. SCHERER. 1984. Performance evaluation of a Decision Support System. Large-scale System 6, 39-48.
- WIERZBICKI A.P. 1982. A Mathematical basis for satisficing decision making, Mathematical Modelling, 3. 391-405.
- ZADEH, L. 1963. Optimality and Non-Scalar-Valued performance criteria. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-8, No 59.
- ZELNY M. 1973. Compromise programming. In: Multiple criteria decision making, J. L. Cochrane and M. Zeleny (Editors). University of South Carolina Press, Columbia, South Carolina, 263-301.