

Aplicabilidade de Algumas Técnicas de Análise Multiobjetivo ao Processo Decisório no Âmbito dos Comitês de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica

Sérgio Brião Jardim, Antonio Eduardo Leão Lanna,

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS – Porto Alegre – RS - sbjdec@puocs.br - lanna@iph.ufrgs.br

Recebido: 13/06/00 – revisado: 24/07/01 – aceito: 24/11/03

RESUMO

A complexidade das ações no plano decisório da Gestão das Águas e a necessidade do atendimento simultâneo das exigências que visam à obtenção do desenvolvimento sustentável, impõem uma abordagem multiobjetivo.

O uso múltiplo das águas, o caráter multidisciplinar e subjetivo dos agentes envolvidos no processo, a aleatoriedade dos eventos hidrológicos, a incerteza dos processos econômicos, sociais e ambientais, a necessária consideração de aspectos de difícil mensuração, como o bem estar social, a preservação do ambiente e as questões culturais e estéticas, além da tradicional eficiência econômica, caracterizam o contexto presente.

Este trabalho apresenta, descreve e compara algumas técnicas de análise multiobjetivo como importante meio de apoio à tomada de decisões diante dos problemas de Gestão das Águas.

Três métodos são aplicados e comparados em um estudo de caso, para suporte à decisão em um Comitê de Gerenciamento, tendo como objetivo estratégico o desenvolvimento sustentável em uma Bacia Hidrográfica, com um cenário configurado a partir da experiência acumulada na última década no Rio Grande do Sul e à luz da legislação vigente para a Política de Recursos Hídricos.

Na análise desenvolvida através dos métodos ELECTRE I e II, Programação de Compromisso e Analítico Hierárquico, consideram-se a participação de múltiplos decisores, a questão da subjetividade e o reconhecimento da incerteza como inerente ao processo.

Palavras-chave: análise multiobjetivo; desenvolvimento sustentável.

INTRODUÇÃO

A instituição da Política Nacional dos Recursos Hídricos, através da Lei Federal 9433 de 8 de janeiro de 1997 e dos Planos Estaduais vigentes neste contexto, reforçam a necessidade de um enfoque atualizado para as questões ligadas à Gestão das Águas.

Cada vez mais, em termos de expectativas e práticas, a abordagem dos problemas na área em questão recorre a outros meios, além da tradicional análise benefício-custo, largamente utilizada e aceita até meados dos anos 70.

A realidade atual tem exigido a consideração dos aspectos ambientais, estéticos, culturais e de bem estar social, além da abordagem estritamente econômica.

A análise multiobjetivo permite a eficiente inclusão de aspectos de difícil mensuração, através de escalas e medidas adequadas para cada uma das novas variáveis que passam a ser admitidas no processo decisório.

Trata-se, em geral, de técnicas baseadas na modelagem matemática e na análise matricial, com forte apoio dos avançados recursos computacionais disponíveis.

O objetivo deste artigo é trazer resultados consistentes com relação à efetiva aplicabilidade de três das mais difundidas técnicas de análise multiobjetivo para a solução

de problemas complexos na gestão dos recursos hídricos. Sendo esta complexidade materializada, no estudo de caso, pela presença de vinte decisores manifestando preferências sobre vinte e sete alternativas de solução avaliadas sob quinze critérios, com quatro estruturas de pesos relativos.

No caso estudado, utilizam-se alternativas discretas e contínuas, dentro de um contexto hipotético, com a utilização de alguns dados reais, constituído para o cenário de um Comitê de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica.

Os dados referentes à composição do comitê, objetivos fixados e critérios de avaliação, foram trazidos da experiência acumulada nos últimos dez anos, principalmente nos comitês dos rios Gravataí e dos Sinos, e comissões criadas para outras bacias hidrográficas no Estado do Rio Grande do Sul, com base nos dispositivos legais vigentes.

O tema do presente trabalho está delimitado, essencialmente, pela formulação descritiva do problema multiobjetivo, apresentação crítica dos tipos de técnicas de análise, estudo e apresentação dos métodos ELECTRE (Roy, 1971), Programação de Compromisso (Zeleny, 1973) e Analítico Hierárquico (Saaty, 1977 e 1980) e o desenvolvimento de um estudo de caso, com a solução do problema através da aplicação dos três métodos estudados, com a comparação dos resultados obtidos.

A fase de estruturação do problema, caracterizada pela discussão e estabelecimento de objetivos, critérios e processo de avaliação e alternativas de solução, antecede ao tema desenvolvido no trabalho, não estando incluída no escopo do mesmo. Ressalta-se que a adequada estruturação do problema é a fase mais importante no apoio à decisão sendo fundamental e determinante da qualidade das decisões a serem tomadas.

Também se pode afirmar que não há sentido na aplicação de ferramentas precisas de avaliação para a solução de problemas mal (ou parcialmente) estruturados.

Há vários processos utilizados para esse fim, podendo ser citados os descritos em Rosenhead (1989), Chelkand (1993), com destaque para o uso dos *mapas cognitivos*, segundo Eden e Ackermann (1998), Montibeller Neto (1996) e Jardim (2001). No presente artigo, parte-se de matrizes de avaliação previamente estabelecidas. Da mesma forma, não faz parte do assunto escolhido a inclusão da incerteza, inerente ao processo decisório, devido à aleatoriedade dos fenômenos hidrológicos e ambientais, e à complexidade da negociações sociais, econômicas e políticas.

A questão da subjetividade é abordada por meio de procedimentos propostos com vistas à minimização dessa característica peculiar à análise multiobjetivo.

Vinte e sete alternativas de solução são avaliadas sob quinze critérios ponderados definindo-se, através de análise de sensibilidade, a solução de melhor compromisso e a *solução mais robusta*, aquela menos sensível à variação da ponderação dos múltiplos objetivos, além da indicação do grupo das alternativas de maior atratividade.

Os resultados são comparados, ressaltando-se as vantagens, desvantagens e limitações das técnicas utilizadas, verificando-se a aplicabilidade de cada uma delas ao contexto decisório dos comitês de gerenciamento de bacia hidrográfica

O CONCEITO MULTIOBJETIVO

Diferentemente das situações em que há problemas com objetivo único, em que a solução ótima é obtida através da simples maximização (ou minimização) de uma função-objetivo de variáveis de decisão sujeitas a restrições, a análise multiobjetivo seleciona a *solução de melhor compromisso* ou, numa abordagem mais detalhada e segura, a *solução mais robusta*. Aqui se busca a otimização do conjunto das funções-objetivo, através de critérios e julgamento das alternativas de solução do problema.

Essa definição se deve ao fato de que, na análise multiobjetivo, a classificação é feita com base em determinados critérios de avaliação e sob condições e cenários específicos que, se alterados, poderão indicar outra alternativa como melhor solução. Isso é feito através da identificação e estudo das *relações-de-troca* (ou de compromisso) entre

os vários objetivos mensuráveis, ou não, e conflitantes por natureza.

Na realidade, a solução apontada para a tomada de decisão, através da análise multiobjetivo, tem caráter fortemente político, resultado da ação conjunta de analistas e decisores.

Na análise multiobjetivo, aplica-se o Princípio dos Ótimos de Pareto segundo o qual, para o conjunto das *soluções não-dominadas*, é impossível sair-se de uma posição sem que algumas alternativas melhorem seu atendimento ao conjunto dos objetivos e outras tenham, em detrimento, sua eficiência diminuída.

Porto e Azevedo (1998), citando Cohon (1978) define o conceito de *não-dominância* da seguinte forma: uma *solução não-dominada* é aquela em que a melhoria de uma função-objetivo só pode ser conseguida às custas da degradação de outra. No conceito multiobjetivo, cada uma dessas *soluções não-dominadas* pode ser escolhida como uma solução ótima no conceito de Pareto.

A Figura 1 mostra, para os objetivos Z1 e Z2, (ambos maximização) a região viável no espaço dos objetivos considerados e o conjunto das *soluções não-dominadas*.

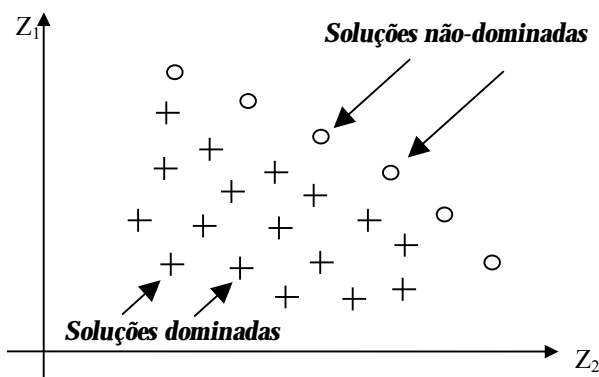


Figura 1 - Espaço dos objetivos *Soluções não dominadas* e *Soluções dominadas* (região viável)

A análise multiobjetivo, através de vários métodos, possibilita o apoio ao processo decisório na escolha da mais adequada das *soluções não-dominadas*, sob os critérios de avaliação adotados e para as condições peculiares de cada problema. Cada um dos aspectos do problema, sujeitos ao processo decisório, é mensurado através de uma função-objetivo, não havendo necessidade de que estas funções utilizem a mesma unidade de medida.

Para a avaliação das questões ambientais, sociais, culturais e de bem-estar da população, por exemplo, de difícil mensuração, surge um dos aspectos críticos da análise multiobjetivo, que é a *subjetividade* inerente ao processo. Esse importante fator depende, essencialmente, do julgamento humano, em termos de preferências manifestadas.

Outra característica de grande influência na análise multiobjetivo, quando aplicada aos problemas dos recursos hídricos, é a *incerteza*, função da aleatoriedade dos fenômenos hidrológicos e dos processos econômicos, sociais e ambientais.

AS TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTIOBJETIVO

As técnicas de análise multiobjetivo podem ser classificadas conforme a posição relativa entre analista e decisor, nos grupos que seguem, segundo Cohon e Marks (1975):

Técnicas de geração das soluções não-dominadas

São técnicas que não levam em conta as preferências do decisor, onde o conjunto das *soluções não-dominadas* é estabelecido pelo analista com base exclusiva nas restrições físicas do problema, recomendando-se para um máximo de três objetivos.

Pelos motivos citados, esse tipo de técnica não será considerado aplicável aos problemas da gestão das águas, no âmbito deste trabalho.

Técnicas com antecipação de preferências

Nessas técnicas, as preferências são estabelecidas *a priori* pelos decisores, pelo analista ou por consenso de ambos.

Esse processo ocorre na forma de manifestação antecipada do juízo de valor sobre as possíveis *relações-de-troca* entre os objetivos fixados e sobre os pesos relativos de julgamento entre eles.

Esses métodos, exemplificados abaixo, não garantem a *não-dominância* das alternativas selecionadas, devendo ser confirmadas por uma análise de sensibilidade.

- Método da Função Multidimensional (Keeney e Wood, 1977)
- Método da Programação por Metas (Charnes e Cooper, 1961)
- Método ELECTRE (Roy, 1971)
- Método do Valor Substituto de Troca (Haines e Hall, 1974)
- Método Analítico Hierárquico (Saaty, 1977 e 1980)

Técnicas com articulação progressiva de preferências

Nessas técnicas, exemplificadas adiante, ocorre a interação progressiva entre analista e decisor ao longo do processo decisório.

Apresentada uma *solução não-dominada*, o decisor manifesta-se sobre a mesma. Não satisfazendo, refaz-se a análise a partir dos ajustes de julgamento, com base no relaxamento de algumas preferências, até obter-se uma nova

solução. O processo é concluído quando for alcançado o nível de satisfação do decisor, atingindo-se a *solução de melhor compromisso*, ou de forma mais exigente, a *solução mais robusta*. É possível que não seja atingido o nível de satisfação do decisor, devendo, mesmo nesse caso, ser apresentada uma solução.

Algumas técnicas nesta classe são:

- Método da Programação de Compromisso (Zeleny, 1973)
- Método dos Passos (Benayoun et al., 1971)
- Método Semops (Monarchi et al., 1973)

As técnicas de análise multiobjetivo são recentes, com desenvolvimento conceitual a partir de 1970 e experiências concretas nos últimos vinte anos.

Essas técnicas caracterizam-se pela complexidade e pela controvérsia sob determinados aspectos, numa fase inicial de desenvolvimento, mas que têm demonstrado sua validade em muitas situações, como meios importantes de apoio à tomada de decisões na área dos recursos hídricos.

Nos grupos decisores das questões que envolvem a Gestão das Águas, como no âmbito dos Comitês de Gerenciamento das Bacias Hidrográficas, as naturais diferenças de ponto de vista, interesses, ideologias e formação dos participantes são fatores sempre presentes que devem ser valorizados no processo decisório.

De forma muito objetiva, Porto e Azevedo (1998) esclarecem que a idéia central das técnicas de análise multiobjetivo é permitir que cada um dos participantes avalie as conseqüências da implementação das suas idéias, com o auxílio de modelos com razoável nível de aceitação, a partir de uma base comum de informações.

METODOLOGIA

A matriz de avaliação

A abordagem multiobjetivo fica mais clara quando estruturada na forma matricial, como mostrado a seguir:

Em síntese, cada uma das n alternativas de solução é avaliada sob os p critérios estabelecidos no processo decisório. Os critérios de avaliação das alternativas representam a especificação dos objetivos em características e qualidades, que se traduzam em medidas adequadas de desempenho das soluções de planejamento.

Na análise, há uma comparação de cada alternativa com todas as demais, com estabelecimento de um hierarquia que aponta o conjunto das soluções de maior atratividade (*não-dominadas*) e a escolha da *solução de melhor compromisso* e, ainda melhor, a *solução mais robusta*, em termos de melhor atendimento do conjunto dos objetivos e sob os critérios fixados para a análise.

Tabela 1 - Matriz de avaliação

		Alternativas				
		A1	A2	A3	.....	An
C r i t é r i ó s C _p	C1	C1(A1)	C1(A2)	C1(A3)	.....	C1(An)
	C2	C2(A1)	C2(A2)	C2(A3)	.....	C2(An)
	C3	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	C _p	C _p (A1)	C _p (A2)	C _p (A3)	.....	C _p (An)

As técnicas utilizadas

Nesse trabalho são apresentadas três técnicas de análise multiobjetivo:

O método ELECTRE I e II (Roy, 1971), como exemplo normal de técnica com manifestação antecipada de preferências.

O método Programação de Compromisso (Zeleny, 1973), como exemplo de técnica com articulação progressiva de preferências.

O Método Analítico Hierárquico (Saaty, 1977 e 1980), também se caracteriza pela manifestação de preferências a priori por parte dos decisores.

As justificativas para a escolha das técnicas utilizadas, são as seguintes:

- a) O método ELECTRE, para a realização de uma análise conclusiva, diante da polêmica existente no meio acadêmico e entre analistas, em termos de aplicabilidade à Gestão das Águas, segundo Cohon e Marks (1975), Harboe (1992) e Zuffo et al. (2002).
- b) O Método de Programação de Compromisso, por ser uma técnica bastante simplificada em termos matemáticos e para verificação da eficácia diante de problemas multiobjetivo complexos.
- c) O Método Analítico Hierárquico por ser uma técnica que reduz o risco de manipulação no processo decisório e por possibilitar a obtenção de julgamentos consistentes, por meio da revisão orientada.

O Método ELECTRE

Descrição do método

O método ELECTRE foi concebido para a abordagem multiobjetivo caracterizada por alternativas avaliadas por critérios preferencialmente qualitativos, com fixa-

ção prévia das preferências, por parte dos decisores. Essa técnica também pode ser usada para variáveis contínuas, sob critérios quantitativos, ou para situações mistas.

A metodologia, desenvolvida por Roy (1971) sustenta-se nos três conceitos fundamentais: *concordância, discordância e valores-limite* e utiliza um *intervalo de escala* no estabelecimento das *relações-de-troca* para a comparação das alternativas, aos pares.

Segundo Gershon et al. (1982) o método se baseia na separação, no conjunto das alternativas de solução, daquelas que são as preferidas na maioria dos critérios de avaliação, sem causar um nível de descontentamento inaceitável para qualquer um dos critérios fixados.

A partir da matriz de avaliação, as alternativas são comparadas, aos pares, com base em relações de preferência.

$a > b$ significa que a alternativa **a** é preferida à alternativa **b**

$a = b$ significa que **a** é equivalente à **b**

É importante ressaltar que o processo admite a intransitividade nas relações de preferência, com base no fato de que os critérios de estabelecimento das preferências podem ser diferentes.

Por exemplo, podemos ter:

$a > b$ **a** é preferida a **b**

$b > c$ **b** é preferida a **c**

$c > a$ **c** é preferida a **a**

Tal situação caracteriza um *ciclo fechado* no contexto do método, determinando a mesma preferência (empate) para as três alternativas.

A *concordância* entre duas alternativas *i* e *j* é uma medida ponderada do número de critérios sob os quais a alternativa *i* é preferida ou equivalente à alternativa *j*.

O *índice de concordância* (0-1) é calculado pela seguinte fórmula:

$$C(i, j) = \frac{\sum [w(k^i) + 1/2w(k^j)]}{\sum w(p)} \tag{1}$$

$w(k^i)$ = pesos dos critérios sob os quais $i > j$

$w(k^j)$ = pesos dos critérios sob os quais $i = j$

$w(p)$ = pesos de todos os critérios

Esses pesos relativos são estabelecidos através do juízo de valor dos decisores, por meio da manifestação de preferências e devem possibilitar a ponderação global de cada critério de avaliação.

Também é indispensável que haja discussão e consenso para o ajuste dos pesos com relação dos intervalos de escala dos critérios de avaliação.

O índice de discordância $D(i, j)$ representa o desconforto sentido pelo decisor ao escolher a alternativa i frente à alternativa j .

Inicialmente é definida uma escala numérica comum para todos os critérios, sendo que cada critério deve ter um intervalo de escala diferente. A escala é usada para comparar o desconforto causado entre o menor valor numérico (*pior* escolha) e o maior valor numérico (*melhor* escolha) de cada critério para cada par de alternativas.

O índice de discordância (0-1) é calculado como segue:

$$D(i, j) = \max_{k \in (j > i)} \{ |Z(j, k) - Z(i, k)| \} / R^* \quad (2)$$

$(j > i)$: conjunto onde a alternativa j é preferida à alternativa i

k : os critérios sob os quais $j > i$

$Z(j, k)$: a avaliação da alternativa j sob o critério k

$Z(i, k)$: a avaliação da alternativa i sob o critério k

R^* : o maior valor numérico dos intervalos de escala.

Os valores p e q são determinados pelos decisores ao avaliarem as alternativas, aos pares, sob os critérios de análise fixados. Assim, tem-se que $p = 1$ significa concordância plena, quando a alternativa i é preferida à alternativa j sob todos os critérios. A condição $q = 0$ significa sem discordância.

Fixam-se os valores limites para p (índice mínimo de concordância) e q (índice máximo de discordância). Por meio desse procedimento, conhecido como *filtragem*, separam-se as alternativas *não-dominadas* que atendem, simultaneamente, aos limites fixados para p e q , mas sem a classificação dessas.

Até aqui, está caracterizado o método ELECTRE I, concebido por Roy (1971).

Essa seleção preliminar das alternativas de maior atratividade, a partir da fixação dos valores limites para p e q , pode ser representada graficamente, através dos símbolos e terminologia que seguem:



representa uma alternativa, na forma de nó.



indica dominância de uma alternativa sobre a outra, em termos de preferência.

O conjunto reduzido das alternativas *não-dominadas*, conhecido como *núcleo* obtido pela *filtragem* é extraído do gráfico, observadas as seguintes condições, segundo Roy (1971):

1. Uma alternativa selecionada não pode dominar outra também selecionada;
2. Cada alternativa dominada (não selecionada) deve ser dominada, pelo menos, por uma das alternativas selecionadas.

Na solução do problema estudado, o autor mostra que os procedimentos e restrições contidas no método ELECTRE I são passíveis de discussão e propõe melhorias para a seleção do núcleo das alternativas de maior atratividade.

No gráfico do método ELECTRE I, mostrado a seguir como ilustração, o conjunto (núcleo) das alternativas de maior atratividade é constituído pelas opções 1, 3 e 5.

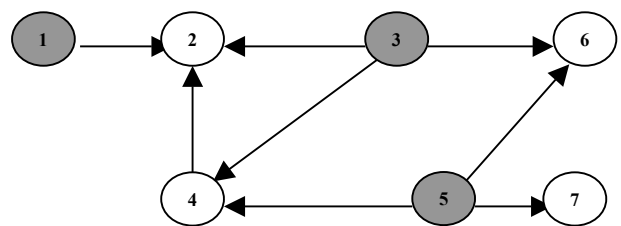


Figura 2 - Gráfico do método ELECTRE

Para a classificação das alternativas selecionadas pelo método ELECTRE I, na fase preliminar, utiliza-se o método aperfeiçoado, conhecido como ELECTRE II.

O processo se baseia na fixação de valores mais estritos para p e q . Isso depende de um aumento na rigidez, ou relaxamento maior por parte dos decisores, em termos de julgamento das alternativas sob os critérios fixados e na forma das preferências manifestadas, como descrito em Roy (1971).

O Método da Programação de Compromisso

O método da Programação de Compromisso caracteriza-se por ser um processo interativo, geralmente com o estabelecimento progressivo das preferências por parte do decisor, até que seja atingida uma solução *satisfatória*. Há situações em que os pesos dos critérios de avaliação decorrem da estrutura do problema.

Apresentado inicialmente por Zeleny (1973), foi adaptado e aplicado na área dos recursos hídricos por Duckstein e Opricovic (1980), numa abordagem multiobjetivo na presença de variáveis discretas.

O método classifica as alternativas *não-dominadas* através de um conceito geométrico do melhor, por meio de uma medida de distância até a *solução ideal*.

Dada a matriz de avaliação das alternativas de solução do problema, segundo os critérios estabelecidos, a *solução ideal* pode ser definida como o vetor

$$Z_i^* = (Z_1^*, Z_2^*, \dots, Z_p^*) \quad (3)$$

onde as funções Z_i^* são as soluções do problema:

$$\begin{aligned} \max Z_i(x) \\ \text{sujeito a: } x \in X \quad e \quad i = 1, 2, \dots, p \end{aligned}$$

onde x é o vetor de decisões, p o número de critérios, X o conjunto das soluções viáveis e $Z_i(x)$ a função-objetivo para o critério i .

A *solução ideal* é, geralmente, inatingível (por pressupor a solução ótima para todos os objetivos através de uma alternativa) e serve como padrão de referência no processo de classificação das soluções *não-dominadas*. Essa classificação é obtida pela determinação da proximidade de cada alternativa *não-dominada* com relação à *solução ideal*.

Uma das medidas de proximidade mais usadas é a que segue:

$$L_s = \left\{ \sum_{i=1}^p \alpha_i [Z_i^* - Z_i(x)]^s \right\}^{1/s} \quad (4)$$

onde s = parâmetro que reflete a importância que os decisores dão aos desvios máximos ($1 \leq s \leq \infty$) e α_i = pesos dos critérios, fixados subjetivamente pelos decisores, ou derivados da estrutura de preferências decorrentes do problema.

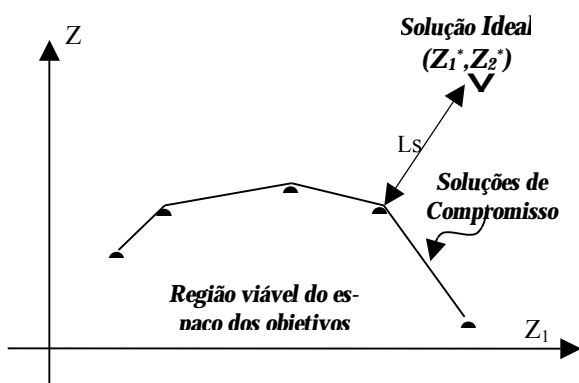


Figura 3 - Representação gráfica da *solução ideal* e das *soluções de compromisso*

A *solução de compromisso* x_s para um dado s é:

$$\min L_s(x) = L_s(x^*)$$

sujeito a: $x \in X$

O termo $[Z_i^* - Z_i(x)]$ é uma medida de desvio da *solução ideal*.

Na Figura 3, vê-se uma ilustração gráfica do método.

A determinação do conjunto das *soluções de compromisso* é obtida resolvendo-se a função acima para valores dados aos pesos $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ e para $1 \leq s \leq \infty$.

Método da Programação de Compromisso

Na prática, o valor $s = 2$ é o mais usado, por refletir um conceito vetorial.

Quando nem todas as funções-objetivo são expressas em termos comensuráveis, pode-se usar uma função linear de escala, com intervalo (0,1), para cada função-objetivo, normalizando desvios.

$$S_i(D_i) = \frac{Z_i^* - Z_i(x)}{Z_i^* - Z_i^{**}} \quad (5)$$

onde Z_i^{**} é definida como $Z_i^{**} = \min Z_i(x)$ sujeito a: $x \in X$ $i = 1, 2, \dots, p$

Para problemas multiobjetivo com alternativas de solução discretizadas faz-se:

Z_i^* O conjunto dos *melhores* valores das funções-objetivo

Z_i^{**} O conjunto dos *piores* valores das funções-objetivo

A *solução de melhor compromisso* é caracterizada pelo vetor dos melhores valores alcançados em cada critério da matriz de avaliação.

$$L_s(x_s^*) = \min L_s(x_s) = \min \left\{ \sum_{i=1}^p \alpha_i \left[\frac{Z_i^* - Z_i(x)}{Z_i^* - Z_i^{**}} \right]^s \right\}^{1/s} \quad (6)$$

Da mesma forma, a pior solução será considerada aquela dada pelo vetor dos piores valores da matriz de avaliação.

Finalmente, calcula-se a distância de cada alternativa até a *solução ideal*. A alternativa que apresentar a menor distância é a *solução de melhor compromisso*.

Como já foi referido, a Programação de Compromisso é um método iterativo. Quando os decisores se derem por satisfeitos, o algoritmo acaba. Caso contrário, variam-se os pesos dos critérios e, por via de consequência as *soluções ideais*, processando-se novamente o algoritmo, até que seja encontrada uma solução *satisfatória* para os decisores.

O Método Analítico Hierárquico

Desenvolvido por Saaty (1977 e 1980), o método Analítico Hierárquico fundamenta-se na comparação, aos pares, entre fatores quantitativos, ou não, com a possibilidade da verificação da consistência e validade dos julgamentos.

Em essência, o método fornece a hierarquia (classificação) das alternativas através da comparação paritária, utilizando matrizes quadradas, recíprocas, positivas e irreduzíveis (que não têm zero) com base nas propriedades da álgebra matricial.

Segundo o teorema de Perron-Frobenius, para essas matrizes, todos os autovalores são nulos, exceto um, o autovalor máximo $\lambda_{\text{máx}}$ que é igual a n (a ordem da matriz = o número de alternativas comparadas). A esse autovalor máximo, corresponde um autovetor único w que, normalizado, fornece a hierarquia das alternativas, na forma de um vetor de prioridades (onde a soma dos componentes é sempre igual à unidade). Saaty (1980) comprovou a precisão do vetor de prioridades (autovetor w) através da verificação de casos com comparações paritárias realizadas com medidas (pesos) reais.

Segundo a teoria matricial, na relação $Aw = nw$, sendo A a matriz de comparação paritária, pode-se usar o artifício $(A - n)w = 0$ e $(A - nI)w = 0$, onde I é a matriz identidade. A matriz A também é unitária (todos $a_{i,i} = 1$). A última equação possui uma solução diferente de zero para $n = \lambda_{\text{máx}}$ quando o determinante da matriz $|A - nI|$ for nulo (o que leva à equação característica de A). Quando $\lambda_{\text{máx}} = n$, tem-se julgamentos perfeitos e consistência total.

Na prática, é comum a ocorrência de desvios no estabelecimento dos juízos de valor, principalmente quando cresce um número n de alternativas comparadas, acarretando a situação $\lambda_{\text{máx}} > n$.

O desvio entre $\lambda_{\text{máx}}$ e n é usado, conforme Saaty (1980) com uma medida de consistência dos julgamentos, representados pela matriz de comparação aos pares. O índice de consistência de uma matriz quadrada é dada por $IC = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1}$. Tem-se consistência quando $IC \leq 0,1$.

Por exemplo, sejam n alternativas de solução de um problema na área da Gestão das Águas conforme apresentado na Tabela 2.

Todas as n alternativas são julgadas sob os m critérios de avaliação estabelecidos no processo.

A ponderação (pesos relativos) dos critérios de avaliação pode ser definida pela estrutura do contexto decisório, ou fixada de uma forma menos subjetiva através da matriz subjetiva da Tabela 3.

O vetor de prioridades (autovetor normalizado) fornecerá a hierarquização (ponderação) dos critérios de

avaliação. Os pesos ($p_1, 2; \dots; p_{m-1,m}$) atribuídos pelo(s) decisor(es), como resultado das comparações paritárias entre os m critérios de avaliação, são baseados em uma escala 1 a 9, cujo os significados estão relacionados na Tabela 4.

Em Saaty (1980) pode ser encontrado um extenso registro de experiências que comprovam a adequação da escala 1-9 para julgamentos qualitativos.

Tabela 2 - Matriz de avaliação Método Analítico Hierárquico

Critérios de Avaliação	Alternativas			
	A1	A2	.....	An
C1	w1(C1)	w2(C1)	.....	wn(C1)
C2	w1(C2)	w2(C2)	.....	wn(C2)
⋮	⋮
Cm	w1(Cm)	w2(Cm)	.....	wn(Cm)

Tabela 3 - Matriz Subjetiva Método Analítico Hierárquico

Critérios de Avaliação	Critérios de Avaliação				
	C1	C2	C3	...	Cm
C1	1	p1,2	p1,3	...	p1,m
C2		1	p2,3	...	p2,m
C3			1	...	p3,m
⋮				...	⋮
Cm				...	1

Tabela 4 - Escala de avaliação subjetiva Método Analítico Hierárquico

Intensidade de Importância $P_{i,j}$	Significado
1	<i>i</i> tem a mesma importância que <i>j</i>
3	<i>i</i> é um pouco mais importante que <i>j</i>
5	<i>i</i> é muito mais importante que <i>j</i>
7	está demonstrado que <i>i</i> é muito mais importante que <i>j</i>
9	<i>i</i> tem importância absoluta sobre <i>j</i>
2, 4, 6, 8	valores de compromisso

Na seqüência, as n alternativas são hierarquizadas sob cada um dos m critérios de avaliação. Essas são as chamadas matrizes tecnológicas. Por exemplo, a classificação das alternativas sob o critério C1 é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Matriz Tecnológica - Critério C1
Método Analítico Hierárquico

	A1	A2	A3	....	An
A1	1	$\frac{w1(C1)}{w2(C1)}$	$\frac{w1(C1)}{w3(C1)}$	....	$\frac{w1(C1)}{wn(C1)}$
A2		1	$\frac{w2(C1)}{w3(C1)}$	....	$\frac{w2(C1)}{wn(C1)}$
A3			1	....	$\frac{w3(C1)}{wn(C1)}$
⋮				⋮
An					1

O vetor de prioridades (autovetor normalizado) fornecerá a classificação das alternativas sob o critério C1. O autovalor máximo $\lambda_{m\acute{a}x}$, da mesma forma, possibilitará a verificação da consistência dos julgamentos.

Aqui, as matrizes tecnológicas são formadas a partir dos dados $w_i(C_j)$ $i = 1, \dots, n$ $j = 1, \dots, m$, da matriz de avaliação. Na matriz apresentada, pressupõe-se a utilização de variáveis quantitativas, todas mensuráveis, conhecendo-se o desempenho de cada alternativa de solução, sob cada um dos critérios de avaliação. Não havendo a matriz de avaliação, as matrizes tecnológicas são formadas de modo idêntico ao usado para a matriz subjetiva, usando-se a escala 1-9.

Os m vetores de prioridades (classificações) formam a matriz de prioridades, com n linhas e m colunas apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 - Matriz de Prioridades
Método Analítico Hierárquico

C1	C2	....	Cm
w1,1	w1,2	....	w1,m
w2,1	w2,2	....	w2,m
⋮	⋮	⋮	⋮
wn,1	wn,2	....	Wn,m

A classificação final das n alternativas (P1, P2, ..., Pn) sob os m critérios de avaliação, obtém-se através da ponderação das m classificações contidas na matriz de prio-

ridades, por meio do vetor dos pesos relativos dos critérios de avaliação (w_1, w_2, \dots, w_n), apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação das alternativas de solução - Método Analítico Hierárquico

C1	C2	...	Cm		
w1,1	w1,2	...	w1,m	w1	P1
w2,1	w2,2	...	w2,m	w2	P2
⋮	⋮		⋮	X	=
⋮	⋮		⋮	⋮	⋮
wn,1	wn,2	...	wn,m	wm	Pn

APLICAÇÃO

A análise multiobjetivo é aplicada ao problema decisório destinado à seleção e ao ordenamento das ações de intervenção no contexto de uma bacia hidrográfica, com vistas ao *Desenvolvimento Sustentável*.

O ambiente de decisão é o Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do rio Gravataí, com planejamento plurianual, escala quinzenal.

Trata-se de um caso hipotético, mas configurado a partir de uma base de real dados, obtida por meio de entrevistas e contatos com a vivência do problema no Rio Grande do Sul e de conformidade com a visão e prescrições instituídas pela Lei Federal 9433 e pela Lei Estadual 10350.

O problema foi estruturado a partir da proposta de processo de materialização de ações exemplificado em Lanna (1998), para o objetivo em questão e concebido para testar e comparar os três métodos de análise multiobjetivo para um cenário complexo, com um número elevado de alternativas de solução, com múltiplos decisores no âmbito do contexto decisório de um Comitê de Gerenciamento de Bacia Hidrográfica e sob vários critérios ponderados de avaliação.

A subjetividade, característica inerente do processo decisório, deve ser considerada no estabelecimento dos pesos relativos dos critérios de avaliação fixados para o estudo de caso.

- Objetivo Estratégico: Desenvolvimento Sustentável na Bacia Hidrográfica
- Objetivos Sociais:
1. Melhorias na saúde pública
 2. Aumento das oportunidades

- educacionais, culturais e comunitárias
- Objetivos Ambientais:
3. Aumento das oportunidades recreacionais
 4. Diminuição das diferenças de renda *per capita*
 5. Proteção à água
 6. Proteção à flora
 7. Proteção à fauna
 8. Proteção ao solo
- Objetivos Econômicos:
9. Diminuição dos prejuízos devidos às causas naturais
 10. Estímulo à agricultura
 11. Estímulo à industrialização

Estratégias e Ações de Intervenção

Estratégia A: Equidade Social

Ações:

- A1: Programas de educação básica e comunitária
- A2: Implantação de parques aquáticos, concessão à iniciativa privada
- A3: Estímulo aos empreendimentos de mão-de-obra intensiva, financiamento para moradia popular a juros subsidiados

Estratégia B: Preservação Ambiental

Ações:

- B1: Implantação de sistemas de tratamento de efluentes
- B2: Criação de reservas florestais e proteção de matas ciliares
- B3: Criação de reservas para a fauna

Estratégia C: Crescimento Econômico

Ações:

- C1: Construção de reservatórios e diques
- C2: Investimentos para a implantação de áreas irrigadas
- C3: Crédito para financiamento de investimentos industriais, incentivos fiscais, empréstimos a juros subsidiados

Alternativas de Solução:

Foram admitidas vinte e sete alternativas de solução, que resultaram das combinações possíveis de três ações, com base nas estratégias de intervenção estabelecidas. Ou seja, cada alternativa é constituída de três ações de intervenção, uma de cada estratégia fixada.

Tabela 8 - Critérios de avaliação

Critérios de Avaliação		Medida	Especificação
Critérios sociais:	1. Diminuição das doenças de veiculação hídrica	Subjetiva	Classificação 1 a 9
	2. Número de empregos gerados	10 ³ vagas/ano	número de vagas oferecidas por ano, até o final do período
	3. Frequência do atendimento recreacional	10 ³ hab. at./ano	número de pessoas atendidas por ano, até o final do período
	4. Capacidade de agregação participativa comunitária	Subjetiva	Classificação 1 a 9
	5. Aceitabilidade por parte da população	Subjetiva	Classificação 1 a 9
Critérios Ambientais	6. Redução da carga de poluição hídrica	Subj.	Classificação 1 a 9
	7. Criação de reservas florestais e proteção de matas ciliares	ha/prot./ano	área protegida, no final do período
	8. Conservação do solo	ha/cons./ano	área conservada no final do período
	9. Criação de reservas animais	nºcom. prot/ano	Número de comunidades protegidas no final do período
	10. Recuperação e preservação de banhados	ha/pres./ano	área preservada /recuperada no final do período
Critérios Econômicos	11. Custo de Implantação	10 ⁶ R\$/ano	custo anual (valor presente)
	12. Custo de operação e manutenção	10 ⁶ R\$/ano	custo anual (valor presente)
	13. Aumento da Produção Agrícola	%	Porcentagem de aumento anual no período
	14. Valor dos investimentos estimulados	10 ⁹ R\$	valor final do período
	15. Aumento da renda líquida regional, em função da diminuição dos prejuízos devidos às causas naturais	%	Incremento projetado, após o término das obras

A Tabela 9, a seguir, resume e especifica as alternativas consideradas no processo decisório.

Tabela 9 - Alternativas de solução

Alternativa	Ações	Alternativa	Ações	Alternativa	Ações
1	A1B1C1	10	A2B1C1	19	A3B1C1
2	A1B1C2	11	A2B1C2	20	A3B1C2
3	A1B1C3	12	A2B1C3	21	A3B1C3
4	A1B2C1	13	A2B2C1	22	A3B2C1
5	A1B2C2	14	A2B2C2	23	A3B2C2
6	A1B2C3	15	A2B2C3	24	A3B2C3
7	A1B3C1	16	A2B3C1	25	A3B3C1
8	A1B3C2	17	A2B3C2	26	A3B3C2
9	A1B3C3	18	A2B3C3	27	A3B3C3

Por exemplo, a alternativa 16, indicada no recurso espacial mostrado a seguir, associa a implantação de parques aquáticos com criação de reservas para a fauna e construção de reservatórios e diques.

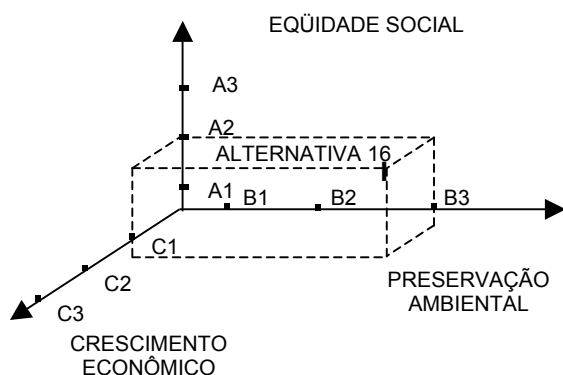


Figura 4 - Composição das Alternativas de Solução

Ponderação dos critérios de avaliação

O estabelecimento dos pesos relativos dos critérios de avaliação foi feito com a utilização do Método Analítico Hierárquico Saaty (1977, 1980).

Em síntese, essa aplicação foi proposta por Singer e Harris (1991) e por Simonovic (1998), considerando a importância da subjetividade nos julgamentos qualitativos, diante de problemas multiobjetivo.

Os quinze critérios de julgamento estabelecidos foram avaliados, através da comparação aos pares, nas visões dos representantes do grupo decisor do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica.

Os vinte decisores, segundo a composição adaptada da proposta para o Comitê do Rio Gravatá para este estudo de caso, foram considerados com pesos idênticos ($1/20 = 0,05$), discriminados como segue.

Composição do grupo decisor

Grupo I - usuários da água - 40% dos votos, com 8 representantes (companhias de saneamento básico, indústrias, agricultura, mineração/navegação e pesca/recreação).

Grupo II - população da bacia - 40% dos votos, com 8 representantes (Câmara Municipais, ONG's, Associações Técnicas Científicas, Instituições de Ensino Superior, Sindicatos de Trabalhadores Urbanos e Rurais).

Grupo III - Administração Federal e Estadual - 20% dos votos, com 4 representantes (representantes do Governo Federal e Estadual).

No primeiro nível, os três objetivos principais, equidade social, preservação ambiental e crescimento econômico são julgados pelos vinte decisores, por comparação aos pares, obtendo-se a primeira classificação representada pelo vetor de prioridades dos objetivos principais.

No segundo nível, são hierarquizados os cinco critérios de avaliação para cada objetivo principal, por meio do julgamento, de novo, dos vinte decisores, por comparação aos pares. Aqui são obtidos três vetores de prioridades, que classificam os critérios de avaliação para cada objetivo principal.

A hierarquização final, que fornece a ponderação dos quinze critérios de avaliação, é obtida pela multiplicação de cada elemento do vetor de prioridades dos objetivos principais, pelos elementos do vetor de prioridades dos correspondentes critérios de avaliação.

Hierarquização dos objetivos principais (nível 1)

Objetivos principais:

ES: Equidade Social

PA: Preservação Ambiental

CE: Crescimento Econômico

Por exemplo, a comparação dos objetivos principais, sob a visão dos representantes do abas-tecimento de água é apresentada na Figura 6.

Matrizes semelhantes de comparação paritária foram estabelecidas para os demais dezoito decisores.

A hierarquização dos objetivos principais, obtida pela ponderação dos vinte vetores da matriz de prioridades através do vetor de prioridades do grupo decisor, foi a seguinte:

$$ES = 0,382; CE = 0,355 \text{ e } PA = 0,263$$

A mesma sistemática foi utilizada para estabelecer a hierarquização dos critérios de avaliação, para cada objetivo principal.

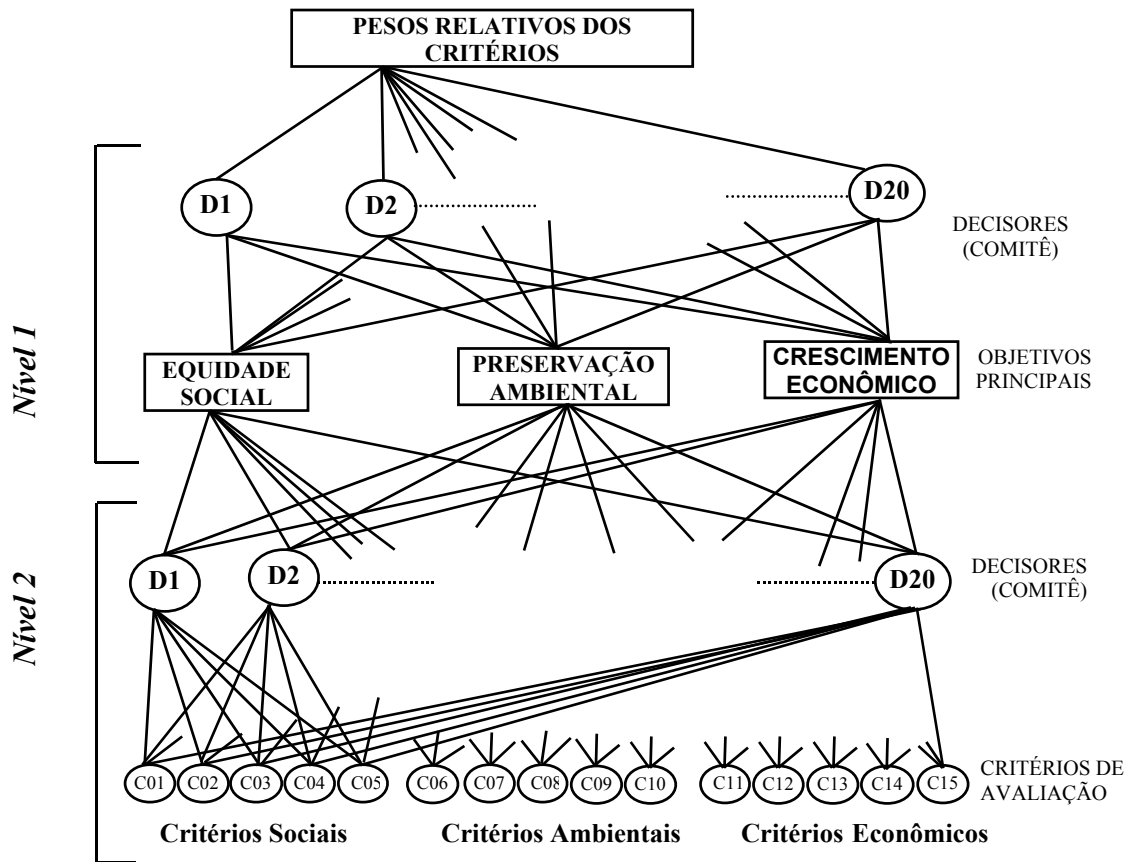


Figura 5 - Ponderação dos critérios de avaliação - Método Analítico Hierárquico - Estrutura de hierarquização

	ES	PA	CE
ES	1	3	9
PA		1	7
CE			1

Auto-valor máximo (AV) = 3,08
 Índice de consistência (IC) = 0,04
 Vetor de prioridades (VP) = 0,655 0,290 0,055

Figura 6 - Matriz de comparação dos objetivos principais - Visão dos representantes do abastecimento de água

A hierarquização final dos critérios de avaliação, foi obtida da forma que segue, pelo produto dos pesos dos critérios de cada objetivo principal, pelo peso do respectivo objetivo principal, apresentada na Tabela 10.

Tabela 10 - Ponderação final dos critérios de avaliação. Exemplo: Método Analítico Hierárquico

Objetivo Principal	Peso	Crítérios de Avaliação	Peso	Ponderação Final
Equidade Social	0.382	C1	0.341	0.130
		C2	0.348	0.133
		C3	0.136	0.052
		C4	0.066	0.025
		C5	0.109	0.042
Preservação Ambiental	0.263	C6	0.359	0.094
		C7	0.149	0.039
		C8	0.326	0.086
		C9	0.060	0.016
		C10	0.106	0.028
Crescimento Econômico	0.355	C11	0.202	0.072
		C12	0.101	0.036
		C13	0.175	0.062
		C14	0.271	0.096
		C15	0.251	0.089

Matriz de avaliação

As vinte e sete alternativas de solução do problema multiobjetivo são avaliadas pelos vinte decisores do Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica, assessorados por especialistas, sob os quinze critérios ponderados de julgamento estabelecidos, conforme mostrado na Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz de avaliação

Critérios		Pesos	Alternativas						
Item	medi-da		1	2	3	...	25	26	27
C1	1 a 9	0.130	8,5	8,2	6,4	...	6,0	5,4	4,0
C2	10 ³ va-gas/ano	0.133	1,15	0,43	1,35	...	10,82	10,10	11,02
C3	10 ³ hab. at/ano	0.052	0,17	0,09	0,27	...	0,95	0,87	1,05
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	...	⋮	⋮	⋮
C13	%	0.062	3	20	2	...	4	18	3
C14	10 ⁹ R\$	0.096	0,29	0,31	2,19	...	0,39	0,40	2,28
C15	%	0.089	4	2	2	...	5	2	2

Solução do problema

O problema multiobjetivo formulado para o estudo de caso foi resolvido pelos três métodos de análise apresentados.

Definiu-se a *solução mais robusta*, consideradas três estruturas de pesos relativos para os critérios de avaliação, além da ponderação original: ênfase social, ênfase ambiental e ênfase econômica, para os três métodos aplicados.

A semelhança dos resultados obtidos pelos métodos foi verificada através da comparação entre as posições mais significativas nas classificações das vinte e sete alternativas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Método ELECTRE

Através do ELECTRE I foi gerado o *núcleo* ("kernel") das alternativas de maior atratividade (*não-dominadas*), sem ordenamento.

Na seqüência, através do ELECTRE II, foi estabelecida a classificação das vinte e sete alternativas, segundo os quinze critérios ponderados de avaliação.

Os pesos relativos usados para a determinação dos índices de concordância e a amplitude da escala numérica comum para cálculo dos índices de discordância, estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Pesos relativos e amplitudes da escala numérica comum dos critérios de avaliação

Critério de avaliação	Peso relativo	Amplitude da escala numérica comum
C1	0.130	200
C2	0.133	180
C3	0.052	130
C4	0.025	120
C5	0.042	140
C6	0.094	170
C7	0.039	160
C8	0.086	150
C9	0.016	100
C10	0.028	140
C11	0.072	200
C12	0.036	110
C13	0.062	170
C14	0.096	180
C15	0.089	160

Para a fixação dos valores de concordância mínima (p) e discordância máxima (q) foi utilizado um critério alternativo ao tradicional arbitramento dos pares (p, q), que tem sido feito de forma aleatória.

Conforme Schäffer (1999), na aplicação dos métodos ELECTRE I e II os valores p e q podem ser fixados com base na distribuição dos índices de concordância e discordância, através da média aritmética e do desvio-padrão.

Na Tabela 13 são apresentadas sugestões para a escolha dos valores de p e q , que são característicos para cada problema analisado, e que, naturalmente, podem ser alteradas de acordo com o julgamento do grupo decisor.

Tabela 13 - Sugestões para a escolha dos valores de p e q - Método ELECTRE

Tipo de estrutura de preferência	p	q	Probabilidade de criar uma relação de preferência	Número de elementos do núcleo
Fraca	$m_1 + \sigma_1 / 2$	$m_2 - \sigma_2 / 2$	0,095	médio
Forte	$m_1 + \sigma_1$	$m_2 - \sigma_2$	0,025	grande

Para a estrutura de preferências de caso estudado foram adotados os valores apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Média e desvio-padrão de $C_{i,j}$ e $D_{i,j}$ Método ELECTRE - Pesos Originais

Matriz	média (m)	desvio-padrão (σ)
Concordância	0,500	0,143
Discordância	0,638	0,157

Para a obtenção do *núcleo* (conjunto reduzido das alternativas *não-dominadas*), gerado pelo ELECTRE I, inicialmente utilizou-se a chamada preferência normal, comumente usada, através da fixação aleatória de $p=0,6$ e $q=0,4$.

O resultado apresentou um *núcleo* com as 18 (dezoito) alternativas *não-dominadas*, 1- 2 - 3- 4 - 5 - 6 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 19 - 20 - 21 - 22 - 23 - e 24, o que caracteriza um número ainda muito elevado de alternativas para a análise.

Isso se deve à estrutura complexa do caso estudado, deliberadamente constituída de muitas alternativas de solução, com avaliações semelhantes, o que torna difícil a classificação.

Adotando o critério proposto por Schäffer (1999) e levando em conta a estrutura de preferências do caso estudado, foram fixados valores menos estritos para p e q , gerando-se um *núcleo* com um número satisfatoriamente menor de alternativas *não-dominadas*, 1-2-3-4- 6-10-11-14-15-19-20-21- e 24.

Deve ser observado que, comparando os dois *núcleos* gerados pelo ELECTRE I, utilizando as preferências “normal” e fraca, no *núcleo* menor não aparece a alternativa 23, embora tratando-se de uma importante alternativa de solução, como será mostrado adiante.

Registre-se, então, que alternativas importantes e válidas de solução podem ser eliminadas indevidamente através do ELECTRE I, no processo de *filtragem* para a redução do conjunto de alternativas para a análise, em casos semelhantes ao apresentado.

Vê-se na seqüência, que a aplicação do ELECTRE II para o universo das 27 (vinte e sete) alternativas do problema (e não apenas para as *não - dominadas* geradas pelo ELECTRE I), resgata a alternativa 23 com uma boa classificação no ordenamento final.

Na Figura 8, estão representados os gráficos de preferência fraca (e *núcleo*) e de preferência forte.

Observe-se que, na página anterior, as alternativas 22 (dominada apenas pela alternativa 19) e 23 (dominada apenas pela alternativa 20), embora não constantes no *núcleo* (gerado pelo ELECTRE I), foram resgatadas pelo ELECTRE II, sendo classificadas em terceiro lugar.

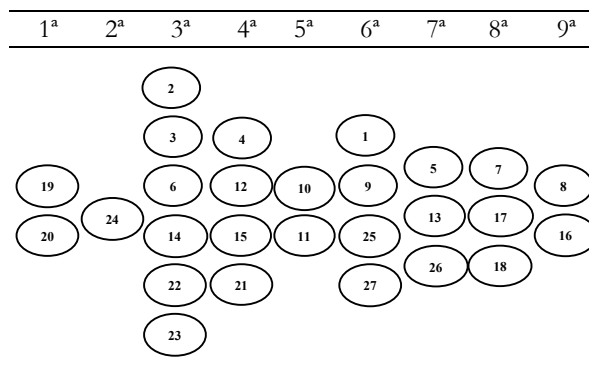


Figura 7 - Classificação das alternativas Método ELECTRE - Pesos originais

Método da Programação de Compromisso

O problema foi resolvido pelo método da Programação de Compromisso, a partir da matriz de avaliação previamente estabelecida.

Os pesos relativos e os valores limites usados para os critérios de avaliação, extraídos da matriz de avaliação, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros da Programação de Compromisso – Estudo de caso Pesos originais

Critério de avaliação	Peso Relativo	Melhor valor (Z_i^*)	Pior valor (Z_i^{**})	Medida
C1	0.130	8.5	3.7	Subjetiva
C2	0.133	11.1	0.13	10 ³ vagas/ano
C3	0.052	13.1	0.09	10 ³ hab.at./ano
C4	0.025	8.8	4.9	Subjetiva
C5	0.042	8.6	4.6	Subjetiva
C6	0.094	8.7	3.8	Subjetiva
C7	0.039	700	60	ha prot/ano
C8	0.086	1800	65	ha cons./ano
C9	0.016	1180	10	nº com. prot/ano
C10	0.028	800	10	ha presen/ano
C11	0.072	19.9	122.5	10 ⁶ R\$/ano
C12	0.036	4.4	32.8	10 ⁶ R\$/ano
C13	0.062	20	1	%
C14	0.096	2.40	0.39	10 ⁹ R\$
C15	0.089	5	1	%

A classificação das alternativas está mostrada na Tabela 16 e na Figura 9.

Tabela 16 - Classificação das alternativas
Método da Programação de Compromisso
Estudo de caso - Pesos originais

Alternativa	Classificação (s = 2)
1	0,20
2	0,19
3	0,20
4	0,20
5	0,21
6	0,22
7	0,22
8	0,22
9	0,23
10	0,20
11	0,19
12	0,21
13	0,23
14	0,22
15	0,24
16	0,24
17	0,25
18	0,25
19	0,15
20	0,13*
21	0,18
22	0,16
23	0,16
24	0,20
25	0,17
26	0,17
27	0,22

* Solução de melhor compromisso

Método Analítico Hierárquico

A ponderação dos critérios de avaliação, através das matrizes subjetivas, foi calculada pelo método Analítico Hierárquico.

O vetor de prioridades encontrado representa, na realidade, os pesos relativos dos critérios de avaliação.

Para a comparação paritária das vinte e sete alternativas, foram desenvolvidas as quinze matrizes tecnológicas,

de acordo com os quinze critérios de avaliação estabelecidos.

Visando uma apresentação mais sucinta e clara, apresenta-se a sistemática usada para a comparação das alternativas aos pares, por exemplo, para o critério C1: diminuição das doenças de veiculação hídrica, apresentada na Tabela 17.

Tabela 17 - Comparação das alternativas de solução para o critério C1-Método Analítico Hierárquico -Estudo de caso

	1	2	3	...	25	26	27
1	1	8.5/8.2	8.5/6.4	...	8.5/6.0	8.5/5.4	8.5/4.0
2		1	8.2/6.4	...	8.2/6.0	8.2/5.4	8.2/4.0
3			1	...	6.4/6.0	6.4/5.4	6.4/4.0
...			
24				...	5.8/6.0	5.8/5.4	5.8/4.0
25					1	6.0/5.4	6.0/4.0
26						1	5.4/4.0
27							1

Todos os julgamentos apresentam consistência total (IC = 0) e isso se deve à utilização dos dados da matriz de avaliação do caso estudado, previamente estabelecida

O produto da matriz de prioridades formada pelos quinze auto-vetores normalizados das matrizes tecnológicas pelo vetor de prioridades dos critérios de avaliação, fornece a classificação das alternativas de solução, apresentada na Tabela 18 e na Figura 10:

Tabela 18 - Classificação das alternativas - Método Analítico Hierárquico Estudo de caso Pesos originais

	C1	C2	...	C14	C15		
1	0.055	0.010	...	0.012	0.053	0.130	0.031
2	0.053	0.004	...	0.012	0.027	0.133	0.035
3	0.042	0.012	...	0.088	0.027	X 0.052	= 0.036
...
24	0.039	0.012	...	0.088	0.013	0.036	0.039
25	0.029	0.008	...	0.007	0.040	0.062	0.030
26	0.028	0.001	...	0.007	0.067	0.096	0.040
27	0.025	0.010	...	0.083	0.027	0.089	0.038

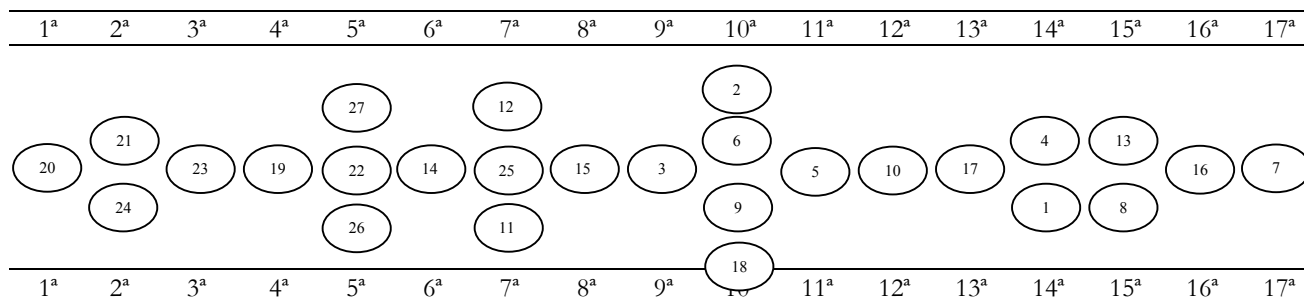


Figura 10 - Classificação das alternativas - Método Analítico Hierárquico - Estudo de caso - Pesos originais

Comparando os resultados da solução do problema estudado, observa-se que os três métodos classificam o mesmo grupo das alternativas de maior atratividade (20 – 19 – 22 – e 23) que se revezam nas primeiras posições, com a alternativa 20 classificada como a *solução de melhor compromisso*, pelas três técnicas apresentadas. O mesmo acontece com as alternativas de menor atratividade (16 – 7 – 8 – 17 e 18), que se revezam nas últimas posições.

Essas alternativas, na prática, seriam descartadas do processo decisório.

As demais alternativas de solução revezam-se no grupo das classificadas na faixa central.

Isso se deve à complexidade intencionalmente estruturada para o caso estudado, com um número elevado de alternativas de solução avaliadas de forma semelhante, sob múltiplos critérios e vários decisores.

Para a obtenção de resultados mais consistentes, foi realizada uma análise de sensibilidade, através da alteração da ponderação dos critérios de avaliação considerados.

Análise de sensibilidade

O problema foi resolvido pelos três métodos de análise para três ênfases diferentes de ponderação dos critérios de avaliação apresentados na Tabela 19, com base nas exigências para o desenvolvimento sustentável: equidade social, preservação ambiental e crescimento econômico.

A seguir, são apresentadas as classificações obtidas pelos três métodos de análise e para os pesos relativos dos critérios de avaliação, para cada ênfase.

Na Figura 11, a classificação das alternativas pelos três métodos, com ênfase social.

Na Figura 12, a classificação das alternativas pelos três métodos, com ênfase ambiental.

Na Figura 13, a classificação das alternativas pelos três métodos, com ênfase econômica.

Tabela 19 - Pesos relativos dos critérios de avaliação para a análise de sensibilidade - Estudo de caso

Crítérios de Avaliação	Ênfase Social	Ênfase Ambiental	Ênfase Econômica
C1	0.21	0.07	0.07
C2	0.21	0.07	0.07
C3	0.07	0.02	0.02
C4	0.04	0.01	0.01
C5	0.07	0.03	0.03
Soma	0.60	0.20	0.20
C6	0.07	0.21	0.07
C7	0.03	0.08	0.03
C8	0.07	0.20	0.07
C9	0.01	0.03	0.01
C10	0.02	0.06	0.02
Soma	0.20	0.60	0.20
C11	0.03	0.03	0.11
C12	0.02	0.02	0.07
C13	0.03	0.03	0.10
C14	0.06	0.06	0.07
C15	0.05	0.05	0.15
Soma	0.20	0.20	0.60

Classificação das alternativas –solução mais robusta

A classificação final das alternativas, para o caso estudado, foi obtida através dos resultados encontrados com a ponderação original dos critérios de avaliação e por meio da análise de sensibilidade com a escolha da *solução mais robusta*.

Diante do elevado número de alternativas de solução consideradas no estudo de caso, foi adotada uma sistemática para a separação das alternativas de maior atratividade (filtragem), que constitui uma sugestão para a solução de problemas multiobjetivo semelhantes ao caso estudado.

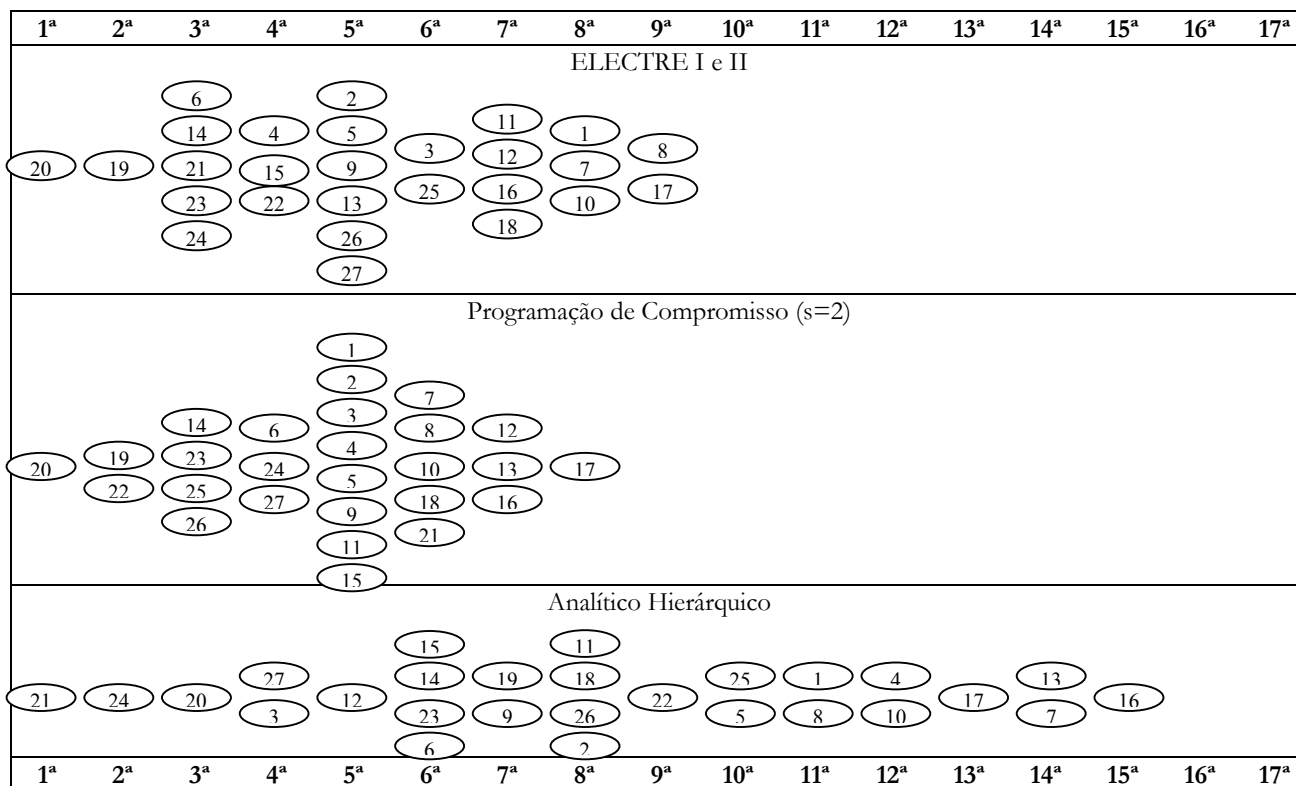


Figura 13 - Classificação das alternativas pelos três métodos - Estudo de caso Análise de sensibilidade - Ênfase econômica

Em síntese, a escolha do conjunto reduzido das soluções de maior atratividade, para a obtenção da classificação final, pode ser feita através da identificação das alternativas classificadas nas cinco primeiras posições nos três métodos, para todas as ponderações dos critérios de avaliação.

Para cada classificação também leva-se em conta o núcleo gerado pelo ELECTRE I.

Por esse critério verifica-se que, para problemas complexos como o do caso estudado, alternativas de solução importantes, desclassificadas pelo ELECTRE I (núcleo), são resgatadas para o processo decisório, como a alternativa 23, dominada apenas pela alternativa 20.

A Tabela 20 resume os dados usados na sistemática proposta e indica o conjunto reduzido das alternativas de maior atratividade, para o caso estudado.

A Tabela 21 indica a solução de melhor compromisso e as alternativas classificadas em 2º e 3º lugares, para cada ponderação dos critérios de avaliação.

A partir dos dados é também possível a identificação das alternativas com menor atratividade (a serem descartadas do processo decisório) e a classificação das alternativas restantes, de menor eficiência.

A Tabela 22 indica a solução mais robusta, ou seja, a alternativa menos sensível à alteração de estrutura de ponderação dos critérios de avaliação.

A Tabela 23 especifica e descreve as estratégias e ações de intervenção que compõem as alternativas de solução de maior atratividade na solução do caso estudado.

Comparação dos resultados

As classificações obtidas pelos três métodos, para as quatro ponderações dos critérios de avaliação das vinte e sete alternativas foram comparadas para a verificação da semelhança dos resultados.

A Tabela 24 mostra o resultado das comparações realizadas entre os três métodos para as quatro ponderações dos critérios de avaliação.

Para cada método e todas as ponderações dos critérios de avaliações, verificou-se a solução de melhor compromisso a solução mais robusta, e as alternativas colocadas em segundo e terceiro lugares.

Consideradas as classificações obtidas pelos três métodos, com as quatro ponderações dos critérios de avaliação, confirma-se a alternativa 20 como solução mais ro-

busta, seguida da alternativa 19 em segundo lugar e a 23 em terceiro.

Tabela 20 - Conjunto reduzido das alternativas de solução de maior atratividade - Estudo de caso

	Pesos ori- ginais	Ênfase social	Ênfase am- biental	Ênfase eco- nômica
	1	1	1	1
	2	2	2	4
	3	3	3	6
ELECTRE I	4	10	6	14
(Núcleo)	6	11	10	15
Alternativas	10	19	14	19
não-dominadas	11	20	15	20
	14	21	19	21
	15		20	24
	19		21	
	20		23	
	21		24	
	24			
Alternativas	19	19	5	6
do núcleo con-	20	20	14	14
firmadas pe-	21	21	20	15
los três méto-			23	20
dos				21
				24
Alternativas	22	22	11	3
adicionadas	23	23	26	23
pelos três mé-		24		
todos				
	19	19	5	3
	20	20	11	6
	21	21	14	14
Conjunto fi-	22	22	20	15
nal reduzido	23	23	23	20
		24	26	21
				23
				24

Tabela 21 - Solução de melhor compromisso para cada ponderação dos critérios de avaliação - Estudo de caso

Ponderação dos critérios de avalia- ção	Classificação		
	Solução de me- lhor compro- misso	2ª Colocada	3ª Colocada
Pesos originais	20	19	23
Ênfase social	20 e 19	21	22
Ênfase ambiental	23	20	11
Ênfase econômica	20	21	19

Tabela 22 - Solução mais robusta - Estudo de caso

Solução mais robusta	2ª Colocada	3ª Colocada
Alternativa 20	Alternativa 19	Alternativa 23

Tabela 23 - Estratégias e ações de intervenção das alternativas de solução de maior atratividade - Estudo de caso

Estra- tégia	Ações de interven- ção	Alternativa					
		19	20	21	22	23	24
Eqüi- dade social	A3) estímulo a em- preendimentos de mão-de-obra inten- siva	X	X	X	X	X	X
Pre- serva- ção ambi- ental	B1) implantação de sistemas de trata- mento e efluentes B2) criação de re- servas florestais e proteção de matas ciliares	X	X	X		X	X
Cresci- mento econô- mico	C1) construção de re-servatórios e di- ques C2) investimentos para implantação de áreas irrigadas C3) crédito para fi- nanciamento e in- vestimentos indus- triais	X			X		X

A alternativa 23, eliminada pela alternativa 20 no núcleo gerado pelo ELECTRE I, ressurge na terceira posição na classificação final.

Analisando as classificações mostradas na Tabela 24, confirma-se o agrupamento das alternativas, com um grande número de empates quando é utilizado o método ELECTRE, devido às avaliações exclusivamente qualitativas. Também, para os métodos Programação de Compromisso e Analítico Hierárquico, ocorreram alguns empates, em menor quantidade, devido à precisão matemática usada no processamento. Para o método da Programação de Compromisso foram usadas duas casas decimais no cálculo da proximidade da solução ideal, para classificação. Para o método Analítico Hierárquico, foram utilizadas três casas decimais no cálculo das prioridades do vetor de classificação. Os empates ocorridos nesses dois métodos podem ser diminuídos, ou eliminados, por meio do aumento da precisão matemática do cálculo. Isto é impossível quando se utiliza o método ELECTRE.

Tabela 24 - Comparação das classificações para os três métodos e as quatro ponderações - Estudo de caso

A	Pesos originais			Ênfase social			Ênfase ambiental			Ênfase econômica		
	ELE	PC	MAH	ELE	PC	MAH	ELE	PC	MAH	ELE	PC	MAH
1	6 ^a	7 ^a	14 ^a	3 ^a	7 ^a	13 ^a	6 ^a	9 ^a	14 ^a	8 ^a	5 ^a	11 ^a
2	3 ^a	6 ^a	10 ^a	3 ^a	7 ^a	11 ^a	5 ^a	3 ^a	6 ^a	5 ^a	5 ^a	8 ^a
3	3 ^a	7 ^a	9 ^a	2 ^a	8 ^a	12 ^a	3 ^a	10 ^a	13 ^a	6 ^a	5 ^a	4 ^a
4	4 ^a	7 ^a	14 ^a	6 ^a	9 ^a	14 ^a	7 ^a	6 ^a	9 ^a	4 ^a	5 ^a	12 ^a
5	7 ^a	8 ^a	11 ^a	5 ^a	10 ^a	13 ^a	4 ^a	2 ^a	2 ^a	5 ^a	5 ^a	5 ^a
6	3 ^a	9 ^a	10 ^a	6 ^a	12 ^a	13 ^a	3 ^a	11 ^a	12 ^a	3 ^a	4 ^a	6 ^a
7	8 ^a	9 ^a	17 ^a	8 ^a	10 ^a	17 ^a	9 ^a	14 ^a	16 ^a	8 ^a	6 ^a	14 ^a
8	9 ^a	9 ^a	15 ^a	10 ^a	11 ^a	16 ^a	8 ^a	7 ^a	10 ^a	9 ^a	6 ^a	11 ^a
9	6 ^a	10 ^a	10 ^a	8 ^a	12 ^a	11 ^a	6 ^a	15 ^a	15 ^a	5 ^a	5 ^a	7 ^a
10	5 ^a	7 ^a	12 ^a	4 ^a	7 ^a	10 ^a	7 ^a	6 ^a	11 ^a	8 ^a	6 ^a	12 ^a
11	5 ^a	6 ^a	7 ^a	3 ^a	7 ^a	8 ^a	3 ^a	1 ^a	3 ^a	7 ^a	5 ^a	8 ^a
12	4 ^a	8 ^a	7 ^a	4 ^a	9 ^a	9 ^a	4 ^a	7 ^a	11 ^a	7 ^a	7 ^a	5 ^a
13	7 ^a	10 ^a	15 ^a	7 ^a	13 ^a	13 ^a	6 ^a	9 ^a	9 ^a	5 ^a	7 ^a	14 ^a
14	3 ^a	9 ^a	6 ^a	5 ^a	14 ^a	9 ^a	3 ^a	5 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	6 ^a
15	4 ^a	11 ^a	8 ^a	7 ^a	15 ^a	10 ^a	4 ^a	12 ^a	8 ^a	4 ^a	5 ^a	6 ^a
16	9 ^a	11 ^a	16 ^a	9 ^a	14 ^a	15 ^a	9 ^a	13 ^a	14 ^a	7 ^a	7 ^a	15 ^a
17	8 ^a	12 ^a	13 ^a	7 ^a	15 ^a	14 ^a	7 ^a	8 ^a	7 ^a	9 ^a	8 ^a	13 ^a
18	8 ^a	12 ^a	10 ^a	10 ^a	15 ^a	12 ^a	8 ^a	15 ^a	14 ^a	7 ^a	6 ^a	8 ^a
19	1 ^a	2 ^a	4 ^a	1 ^a	2 ^a	2 ^a	3 ^a	8 ^a	10 ^a	2 ^a	2 ^a	7 ^a
20	1 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	2 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a
21	4 ^a	5 ^a	2 ^a	1 ^a	5 ^a	2 ^a	4 ^a	10 ^a	11 ^a	3 ^a	6 ^a	1 ^a
22	3 ^a	3 ^a	5 ^a	2 ^a	3 ^a	3 ^a	5 ^a	6 ^a	5 ^a	4 ^a	2 ^a	9 ^a
23	3 ^a	3 ^a	3 ^a	5 ^a	4 ^a	2 ^a	1 ^a	1 ^a	1 ^a	3 ^a	3 ^a	6 ^a
24	2 ^a	7 ^a	2 ^a	2 ^a	7 ^a	4 ^a	2 ^a	11 ^a	7 ^a	3 ^a	4 ^a	2 ^a
25	6 ^a	4 ^a	7 ^a	6 ^a	5 ^a	6 ^a	5 ^a	11 ^a	12 ^a	6 ^a	3 ^a	10 ^a
26	7 ^a	4 ^a	5 ^a	7 ^a	6 ^a	5 ^a	3 ^a	4 ^a	4 ^a	5 ^a	3 ^a	8 ^a
27	6 ^a	9 ^a	5 ^a	7 ^a	8 ^a	7 ^a	6 ^a	15 ^a	14 ^a	5 ^a	4 ^a	4 ^a

Legenda: A = alternativa; ELE = ELECTRE; PC = Programação de Compromisso; MAH = Analítico Hierárquico

Outras constatações relevantes devem ser destacadas.

O método ELECTRE classifica, com consistência, as alternativas 3 e 6 no grupo daquelas de maior atratividade, diferentemente dos outros dois métodos.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise multiobjetivo possibilita, através dos métodos ELECTRE I e II, Programação de Compromisso e Analítico Hierárquico, a consideração simultânea dos aspectos sociais, ambientais e econômicos no complexo contexto decisório dos comitês de gerenciamento de bacia hidrográfica.

Além dos dados quantitativos, mensuráveis e avaliados através de variáveis contínuas, os métodos utilizados possibilitam a consideração da subjetividade, permitindo a introdução dos aspectos qualitativos do processo decisório, através de variáveis discretas, por meio de escalas adequadas de avaliação.

Os três métodos referidos foram estudados e aplicados a um caso complexo, com vinte decisores e vinte e sete alternativas de solução avaliadas sob quinze critérios, com quatro estruturas de peso relativos.

Foi estabelecida como meta maior o *desenvolvimento sustentável* de uma bacia hidrográfica, através da consideração de três estratégias básicas: *equidade social, preservação ambiental e crescimento econômico*.

O aspecto da subjetividade, inerente ao julgamento humano, foi levado em conta na fase de estabelecimento dos pesos relativos dos critérios de avaliação, através da utilização do método Analítico Hierárquico, por meio da verificação da consistência e revisão dos julgamentos.

A alternativa 20, composta pelas ações de intervenção de estímulo aos empreendimentos de mão-de-obra intensiva, de implantação de sistemas de tratamento de efluentes e de investimentos para a implantação de áreas irrigadas, foi classificada como a *solução mais robusta*.

A análise de sensibilidade foi realizada para três ponderações dos critérios de avaliação, além dos pesos originais: ênfase social, ênfase ambiental, e ênfase econômica.

Através das classificações obtidas, usando os três métodos e de forma consistente, foram separadas do conjunto as alternativas de maior atratividade e descartadas as de menor atratividade.

As considerações que seguem, resultaram do estudo e aplicação dos três métodos apresentados para a solução do caso formulado.

a) O método ELECTRE é baseado no conceito de dominância entre as alternativas de solução, a partir de relações de preferências estabelecidas.

É o mais indicado para a solução de problemas com alternativas exclusivamente discretas, pois não depende de dados quantitativos na análise.

Tem sua aplicação limitada diante de problemas complexos como o estudado, porque perde informação ao longo do processo, devido ao baixo poder de discriminação.

Como a lógica do ELECTRE admite a intransitividade, gerando muitos empates, a análise de sensibilidade pode induzir a conclusões equivocadas na verificação da *robustez* das soluções no processo classificatório. Também por esse motivo, diante de problemas complexos como o caso estudado, a aplicação desse método produz o agrupamento de soluções.

De forma isolada e diferentemente dos outros dois métodos, as classificações resultantes da aplicação do ELECTRE incluíram no grupo daquelas de maior atratividade, as alternativas 3e6.

A lógica do método é tema para analistas, com certa complexidade e de difícil assimilação e entendimento para cenários com múltiplos decisores heterogêneos, apresentando dificuldades para a agilidade operacional e interação, indispensáveis no âmbito dos nossos comitês de gerenciamento de bacia hidrográfica.

A utilização do ELECTRE I para a redução do conjunto (*filtragem*) das soluções, através da separação das alternativas *não – dominadas*, pode eliminar alternativas importantes do processo decisório.

No caso estudado, para exemplificar, a alternativa 23, eliminada no ELECTRE I, acabou sendo resgatada como uma ótima opção, ocupando o 3º lugar na classificação final.

Por outro lado, a fixação dos parâmetros de concordância (p) e discordância (q), normalmente feita de forma aleatória, depende da estrutura das matrizes de concordância e discordância, recomendando-se o estabelecimento com base na média e desvio-padrão dos valores dos elementos das referidas matrizes, como foi mostrado para o caso estudado.

b) O método da Programação de Compromisso é ágil, de fácil operacionalização e propicia a interação entre analistas e decisores ao longo do processo decisório.

Dentre os valores 1, 2 e ∞ , normalmente adotados para quantificar o valor que os decisores conferem ao cálculo dos desvios máximos, surge como mais adequado o uso de $s = 2$, por conferir um conceito vetorial ao peso.

O método possibilita uma classificação quantificada, com grande poder de discriminação, o que pode ser obtido através do aumento da precisão no processamento do cálculo matemático da proximidade da *solução ideal* na estrutura do modelo.

c) O Método Analítico Hierárquico baseia-se na análise matricial, sendo o menos passível de manipulação de dados e o único que dispõe de um meio de verificar a consistência dos julgamentos e revisá-los.

Essa revisão de julgamento, quando necessária, deve ser conduzida de forma criteriosa e com cautela por parte dos analistas, para que o processo não seja transformado em mero ajuste matemático na busca da consistência.

Parece-nos o método de mais fácil assimilação e entendimento por parte dos decisores, mesmo em número elevado e de qualificação heterogênea.

A demonstração do uso de matrizes quadradas de comparação paritária, para exemplos simplificados, podem ser um meio altamente esclarecedor e produtivo.

O método propicia, através da interação, a indução à revisão de julgamentos com o entendimento do processo, propiciando minimização de possíveis *lobbies*.

Também possibilita a classificação por níveis hierárquicos, aqui exemplificada na fase de ponderação dos critérios de avaliação do caso estudado.

Esse método também possui alto poder de discriminação no processo classificatório, através do aumento da precisão matemática no cálculo do vetor de prioridades.

Pelo exposto, fica confirmada a aplicabilidade dos métodos da Programação de Compromisso e Analítico Hierárquico para a solução de problemas multiobjetivo complexos na Gestão das Águas.

Por outro lado, ficou demonstrado que há restrições à aplicação do método ELECTRE para a solução de problemas complexos na presença de múltiplos objetivos e critérios de avaliação sob ponderação variada na presença de vários decisores e quando há um elevado número de alternativas de solução, avaliados por medidas contínuas e discretas, muito semelhantes.

As dificuldades aqui encontradas e superadas, ensejam à pesquisa e desenvolvimento de métodos mais ágeis e de assimilação facilitada, sustentados por aplicativos computacionais simplificados e disponibilizados para o contexto decisório da Gestão das Águas.

Por outro lado, é importante ressaltar as limitações do trabalho apresentado.

As técnicas de análise multiobjetivo foram aplicadas a matrizes de avaliação previamente estabelecidas.

Na realidade, as matrizes de avaliação representam um dos resultados do importante processo de estruturação do problema, que deve anteceder à aplicação das técnicas de análise multiobjetivo.

Outro aspecto importante diz respeito à análise multiobjetivo sob incerteza, em função da aleatoriedade de eventos inerentes ao contexto decisório na Gestão das Águas.

Tanto a fase de estruturação dos problemas, como a análise sob incerteza não foram abordados por não fazerem parte do objeto do presente trabalho.

Fica a recomendação para o desenvolvimento de estudos e pesquisas com maior alcance e profundidade sobre esses relevantes aspectos.

REFERÊNCIAS

- BENAYOUN, J.; MONTGOLFIER, J.; TERGNY, J. Linear programming with multiple objective functions: step method (STEM). *Mathematical Programming I*. Amsterdam, p. 366-375, 1971.
- CHARNES, A.; COOPER, W. *Management models and industrial application of linear programming*. New York: John Wiley, 1971.
- CHECKLAND, P. B. *Systems thinking, systems practice*. Chichester: John Wiley & Sons, 1993.
- COHON, J. L. *Multiobjective programming models and planning*. New York: Academic Press, 1978.
- COHON, J. L.; MARKS, D. H. A review and evaluation of multiobjective programming techniques. *Water Resources Research*, Washington, v. 11, n. 2, p. 208-220, apr. 1975.
- DUCKSTEIN, L.; OPRICOVIC, S. Multiobjective optimization in river basin development. *Water Resources Research*, Washington, v. 16, n. 1, p. 14-20, 1980.
- EDEN, C.; ACKERMANN, F. *Making strategy*. London: SAGE Publications, 1998.
- GERSHON, M.; DUCKSTEIN, L.; MCANIFF, R. Multiobjective river basin planning with qualitative criteria. *Water Resources Research*, Washington, v. 18, n. 2, p. 193-202, apr. 1982.
- HAIMES, Y. Y., HALL, W. A. Multiobjectives in waterworks systems analysis: the surrogate worth trade-off method. *Water Resources Research*. Washington, v.10, n.4, pp. 615-624, 1974.
- HARBOE, R. Multiobjective decision making techniques for reservoir operations. *Water Resources Bulletin*, Bethesda, v. 28, n. 1, p. 103-110, feb. 1992.
- JARDIM, S. B. Mapas cognitivos: um caminho para construir estratégias. *Revista Análise*, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 89-119, set. 2001.
- KEENEY, R.; WOOD, E. F. An illustrative example of the use of multiattribute utility theory of water resources planning. *Water Resources Research*, Washington, v. 13, n. 3, p. 705-712, 1977.
- LANNA, A. E. L. Introdução. In: PORTO, R. (org.) *Técnicas quantitativas para o gerenciamento dos recursos hídricos*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.
- MONARCHI, D. E.; KISIEL, C. C.; DUCKSTEIN, L. Interactive multiobjective programming in water resources: a case study. *Water Resources Research*, Washington, v. 9, n. 4, 1977.
- MONTBELLER, G. N. *Mapas cognitivos: uma ferramenta de apoio à estruturação de problemas*. 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.
- PORTO, R. L.; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R. (org.) *Técnicas quantitativas para o gerenciamento dos recursos hídricos*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1998.
- ROSENHEAD, J. *Rational analysis for a problematic world: problem structuring methods for complexity, uncertainty and conflict*. Chichester: John Wiley & Sons, 1989.
- ROY, B. Problems and methods with multiple objective functions. *Mathematical Programming*. Amsterdam, n 1, v. 15, p. 234-281, 1971.
- SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, New York, v. 15, n. 3, p. 234-281, sept. 1977.
- SAATY, T. L. *The analytic hierarchy process*. New York: McGraw-Hill, 1980.
- SCHAFFER, A. *Estudo da distribuição dos índices de concordância e discordância do método ELECTRE*. Porto Alegre: PUCRS, 1999.
- SIMONOVIC, S. P. A systems approach to creative water resources engineering. *IWRA-ABRH-CTH-USP*. Workshop Internacional. São Paulo, 1998.
- SINGER, E. M.; HARRIS, V. Reduzindo a subjetividade da ponderação de critérios na análise multicriterial para recursos hídricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 9., 1991. *Anais...* Rio de Janeiro: ABRH, 1991. v. 2, p. 493-499.
- ZELENY, M. *Multiple criteria decision making*. Columbia: University of Santa Carolina, 1973.
- ZUFFO, A. C. et. al. Aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento de recursos hídricos. *Revista da ABRH*, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 81-102, jan./mar. 2002.

Applicability of Some Multiobjective Analysis Techniques to the Decision-Making Process in the River Basin Management Committees

ABSTRACT

The complexity of actions at the decision level in water management and the requirements of sustainable development require a multiobjective approach to this subject.

The analysis of the decision process in allocating different uses for water involves several difficulties that characterize the present context. Among the most important are the necessary interdisciplinary approach to the subject matter, the subjectivity of the agents involved in the water management process, the randomness of the hydrologic events, the uncertainty of the economic, social and environmental processes, the difficulties in measuring such variables as social well-being and environmental protection and others such as culture and aesthetics, besides the traditional problem of measuring economic efficiency

This paper presents, examines and compares some multiobjective analysis techniques as important support tools for decision-making in water management.

A river basin management committee, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil, is used as a case study to analyse the use of three decision support methods for water management. This analysis takes into account the strategic objective of sustainable development in a scenario developed during the last ten years in Rio Grande do Sul and according to the legal framework on Water Resources at state and Federal level.

The analysis was carried out using the ELECTRE I and II methods, Compromise Programming and Analytic Hierarchy Process, considering multiple stakeholders, the issue of subjectivity and the admission of uncertainty as part of the process

Key Words: multiobjective analysis, sustainable development