PROGRAMAÇÃO COMPROMISSO E SELEÇÃO DE PROJETOS DE RECURSOS HÍDRICOS

Fausto Alfredo Canales[1]

RESUMO --- A programação compromisso é um dos principais métodos de análise multicritério utilizados no ambiente da engenharia de recursos hídricos. Empregando uma combinação do método da ponderação e programação compromisso, neste artigo se apresenta uma forma de padronizar os resultados obtidos (distâncias até a solução ideal), que permita utilizar estes valores em algoritmos de seleção de projetos, por exemplo, o "problema da mochila". Informação relacionada a 18 pequenos projetos hidrelétricos na região rural do Centro-Atlântico da Nicarágua foi usada como estudo de caso para ilustrar os procedimentos explicados neste documento. Foi evidenciado que é possível atribuir maior valor às opções mais próximas da solução ideal, sem afetar a proporcionalidade entre os resultados obtidos através de programação compromisso.

ABSTRACT --- Compromise programming is one of the most important methods for multicriteria analysis in fields related to water resources engineering. By using a combination of the weighting method and compromise programming, this paper presents an approach to standardize the results obtained (distance to the ideal solution), allowing to use these values in portfolio selection algorithms, like the "knapsack problem". Information related to 18 small hydropower projects at the Nicaraguan Central-Atlantic rural region was used as case study to illustrate the procedures explained in this document. It was demonstrated that is possible to give greater value to the options nearer to the ideal solution, without affecting the proportionality between the results obtained by compromise programming.

Palavras-chave: Programação compromisso, seleção de projetos, análise multicritério.

1) Doutorando em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo IPH/UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 - CEP 91501-970. Caixa Postal 15029 - Porto Alegre – RS. E-mail: alcaveman@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

Segundo Nijkamp e Spronk (1979), os métodos de análise multiobjetivo (ou multicritério) têm sido utilizados amplamente no campo da economia e pesquisa operacional como ferramentas no processo de tomada de decisões. A característica básica desta análise multiobjetivo é o fato de permitir levar em consideração uma grande variedade de aspectos de decisão relevantes, sem ser preciso converter todos estes aspectos em termos monetários.

Dentro do moderno conceito de Gestão das Águas (baseado na concepção de Desenvolvimento Sustentável, onde desenvolvimento econômico, eqüidade social e sustentabilidade ambiental devem caminhar lado a lado), os assuntos que envolvem o planejamento do uso, controle e proteção dos recursos hídricos assumem grande importância, devido às interações entre o aproveitamento racional da água e o uso do solo. Logo, para tomada de decisões envolvendo vários agentes e múltiplos usos das águas, faz-se necessário ponderar os aspectos políticos, sociais, econômicos, financeiros, hidrológicos, ambientais e de engenharia, dentre outros, que possam conduzir às soluções que melhor compatibilizem as premissas acima mencionadas (Porto et al. (1997) apud Carvalho (2006)).

Gartner (2001) apud Vilas Boas (2005), afirma que a maior vantagem dos modelos multiobjetivo é que eles proporcionam uma melhor adaptação aos contextos decisórios encontrados na prática e permitem que um grande número de dados, interações e objetivos sejam avaliados de forma integrada. Por outro lado, a maior desvantagem destas abordagens é a inexistência de uma metodologia única que supra as deficiências inerentes a cada um dos métodos.

O objetivo do presente artigo é permitir utilizar os resultados obtidos mediante técnicas de programação compromisso de forma que estes valores (menores distâncias até a solução ideal) possam ser utilizados em algoritmos de seleção de projetos, por exemplo, o problema da mochila, por meio da atribuição de maiores valores às opções mais próximas da solução ideal. Para ilustrar os procedimentos descritos, foi utilizada informação relacionada a 18 pequenos projetos hidrelétricos na região rural do Centro-Atlântico da Nicarágua como estudo de caso.

Antes de apresentar a metodologia, estudo de caso e resultados obtidos neste trabalho, são enumerados brevemente os principais tipos e técnicas de análise multiobjetivo, seguindo com uma descrição da análise mediante a programação compromisso.

1.1 Técnicas de análise multicritério

Segundo Cohon (1978) apud Carvalho (2006), os métodos de otimização multicritério podem ser classificados em três grupos distintos, de acordo com a forma que o decisor precisa utilizar para solucionar o problema. Estas técnicas são definidas como:

- Técnicas que geram o conjunto das soluções não dominadas: Nestas técnicas são consideradas apenas as restrições físicas do problema. A ênfase é dada ao desenvolvimento de informações sobre o problema multicritério. É considerado um vetor de funções objetivo, e mediante tal vetor é gerado o conjunto das soluções não dominadas. As restrições são apresentadas ao decisor para a solução do problema. Dentro destas técnicas é possível mencionar os seguintes métodos:
    - Método da ponderação
    - Método das restrições
    - Método multiobjetivo linear

- Técnicas que utilizam uma articulação antecipada das preferências: Neste grupo as técnicas solicitam, anteriormente à decisão a ser tomada, a opinião do decisor a respeito das eventuais trocas entre os valores relativos aos objetivos. Em dependência das características do problema, as variáveis de decisão utilizadas podem ser contínuas ou discretas. Nesta categoria se podem citar os seguintes métodos:
    - Métodos da função utilidade
    - Programação por metas
    - Método ELECTRE (ELimination and (Et) Choice Translating REality)
    - Método PROMETHEE (Preference Ranking Organisation METHod of Enrichment Evaluation)
    - Método do valor substituto de troca
    - Método da matriz de prioridades ou AHP (Analytical Hierarchy Process)
    - Método da análise-Q.

- Técnicas que utilizam uma articulação progressiva das preferências: Esta técnica é destinada à solução de conflitos entre muitos grupos de interesse, tomadores de decisão ou vários objetivos conflitantes. Neste grupo, assim que uma solução é alcançada, pergunta-se ao decisor se o nível atingido de atendimento aos objetivos é satisfatório, e caso contrário, o problema é novamente modificado, até que o decisor tenha uma postura a partir da melhor solução ou solução satisfatória para o problema. Os métodos mais conhecidos para esta técnica são:
    - Métodos de passo
    - Método da programação compromisso, este último mais estudado e mais conhecido no ambiente de recursos hídricos, área à qual pertence o estudo de caso deste artigo.

Cohon e Marks (1975) analisaram o método da programação compromisso, além de compará-lo entre métodos de outros grupos anteriores. Duckstein e Opricovic (1980) aplicaram o método da programação compromisso no caso da Central Tisza River Basin na Hungria comparando o mesmo com o método Electre. Gershon e Duckstein (1983) compararam as técnicas Electre, Programação Compromisso, Função Utilidade Multidimensional, sendo todas as técnicas aplicadas no planejamento de bacias hidrográficas, com poucas e sensíveis diferenças entre os mesmos. O trabalho de Raju e Pillai (1999) compara cinco métodos distintos para selecionar a melhor configuração de reservatórios no caso da bacia do rio Chaliyar, na Índia, destacando como melhor opção a utilização de programação compromisso.

1.2 Programação compromisso

Cohon (1978) cita os trabalhos realizados por Yu (1973) e Zeleny (1974), nos quais estes autores definem a solução de melhor compromisso como aquela localizada mais próxima da solução ideal e na região das soluções possíveis. Esta solução ideal (ou "ponto de utopia", na terminologia de Yu), por sua vez, é definida por estes autores como a solução que maximizaria simultaneamente cada objetivo individualmente. Esta solução ideal é geralmente inviável; se não fosse deste modo, não existiriam conflitos entre os objetivos. As coordenadas da solução ideal no espaço dos objetivos serão as ótimas para cada objetivo, [Z1°, Z2°,..., Zp°].

Os conceitos de solução de Pareto e solução de melhor compromisso, aplicados na programação compromisso, ficam mais bem explicados mediante a utilização do exemplo mostrado por Carvalho (2006).

Suponha-se uma indústria localizada à margem de um rio, com os seguintes dilemas:

1. Maximização da renda do trabalhador $f_1(x)$ e
2. Minimização da poluição gerada $f_2(x)$.

Se a receita gerada cresce muito, a qualidade ambiental piora, e por outro lado, se existe um programa muito forte de redução de poluentes, implica em redução de receita. Na Figura 1 a fronteira decisória com estes dois objetivos opostos é representada no segmento curvo entre os pontos C e D. Da mesma forma, todos os pontos no trecho AB fazem parte da solução de Pareto, devido que:

a) Todos os pontos interiores são dominados pelos pontos na fronteira;
b) Todos os pontos na fronteira C-A e D-B são dominados pelos pontos A e B.

A Figura 1 ilustra a solução de Pareto enfatizando-se o ponto de solução ideal da solução eficiente, ou de melhor compromisso.

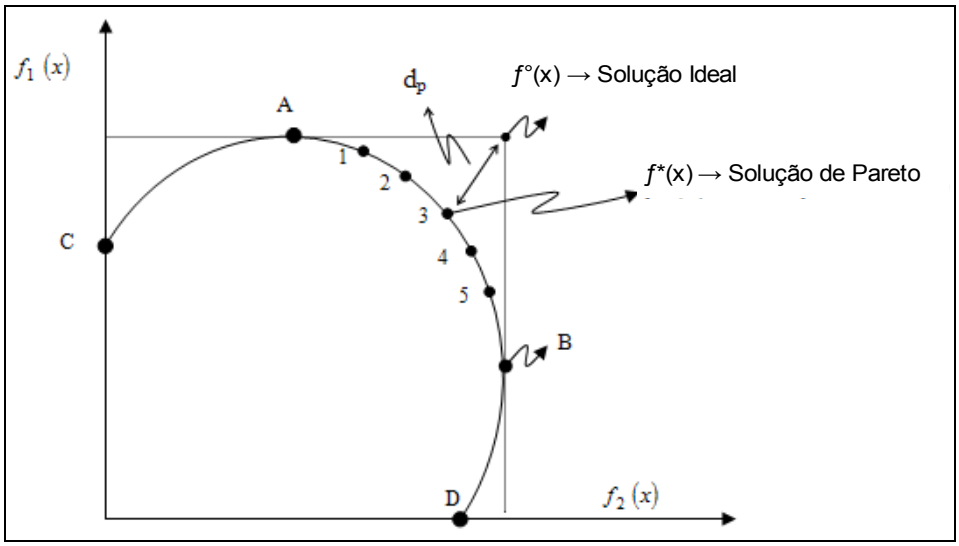


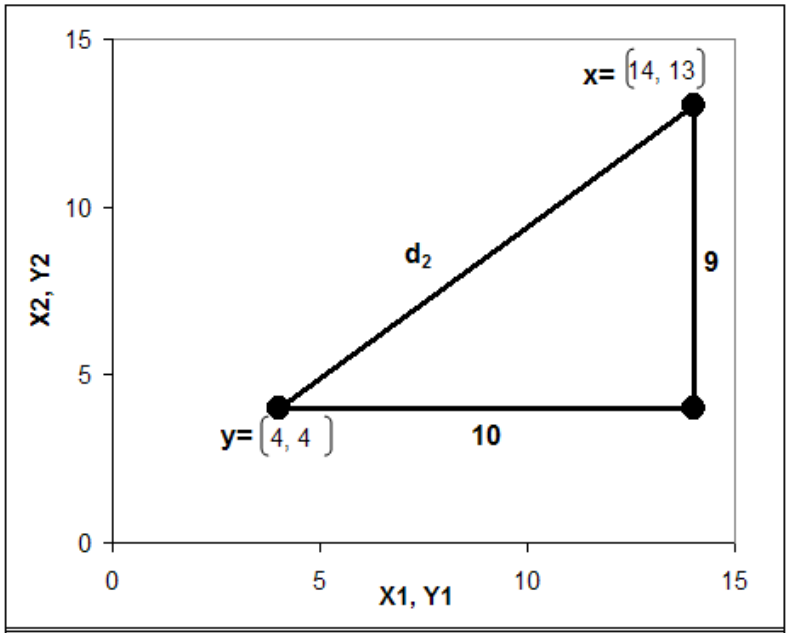
Figura 1 - Ilustração da programação compromisso com dois objetivos opostos.
(Fonte: Carvalho, 2006)

Neste contexto, a solução compromisso é um compromisso entre o que é desejável (solução ideal) e o que é possível (solução de Pareto). Este compromisso é baseado na menor discrepância entre os pontos, sendo expresso, numa forma geral por (d_p). Esta distância métrica (ou parâmetro de Minkowski segundo Nijkamp e Spronk (1979)) pode expressar-se como:

$$d_p = \left(\sum_{i=1}^{n} \left(f_i^o(x) - f_i^*(x) \right)^p \right)^{1/p} \qquad (1)$$

Mesmo que o parâmetro p da Equação (1) possa assumir valores entre 1 até ∞, Nijkamp e Spronk (1979) mencionam que os valores com maior significado matemático são: 1 (distância retangular), 2 (distância euclidiana) e ∞. Na Figura 2 se representa graficamente mediante exemplo, a distância calculada mediante a utilização da Equação (1), segundo explicado por Cohon (1978).

Cada elemento do vetor de objetivos a ser maximizado, pode ser quantificado de alguma forma, portanto, as ordens de grandeza de cada objetivo podem afetar a distância entre o ponto ideal e a solução de melhor compromisso obtida. Carvalho (2006) explica a necessidade de padronizar os elementos das variáveis continuas como pré-requisito para realizar a análise mediante a programação compromisso, a fim de permitir uma análise comparativa entre os elementos de todos os objetivos.



p	$d_p = [(14-4)^p + (13-4)^p]^{1/p}$	
1	19.00	Distância retangular
2	13.45	Distância euclidiana
∞	10.00	Maior dos componentes

Figura 2. Distância entre dois pontos em um espaço bidimensional.
(Fonte: Adaptado de Cohon, 1978)

A continuação detalha-se o processo de padronização e equações relacionadas, segundo o descrito por Carvalho (2006):

A padronização envolve a transformação das escalas das variáveis, de tal forma que todas as variáveis sejam expressas no mesmo intervalo de grandeza, por exemplo, entre zero e um. Um elemento padronizado (f_i') torna-se:

$$f_i'(x) = \frac{f_i(x)}{f_i^{max}(x)}; \qquad \text{indicador de benefícios} \qquad (2)$$

$$f_i'(x) = 1 - \frac{f_i(x)}{f_i^{max}(x)}; \qquad \text{indicador de custos} \qquad (3)$$

Onde $f_i^{max}(x)$ é o máximo valor de $f_i(x)$. Isto pode ser calculado como:

$$f_i^{max}(x) = \max_{i=1}^{n} f_i(x) \qquad (4)$$

O objetivo destas equações é garantir que $0 \leq f_i' \leq 1$, sendo melhores resultados aqueles mais próximos da unidade.

Alternativamente, os procedimentos anteriores podem ser representados por:

$$f_i'(x) = \frac{f_i(x) - f_i^{min}(x)}{f_i^{max}(x) - f_i^{min}(x)} \quad ; \qquad \text{para indicador de benefício} \qquad (5)$$

$$f_i'(x) = \frac{f_i^{max}(x) - f_i(x)}{f_i^{max}(x) - f_i^{min}(x)} \quad ; \qquad \text{para indicador de custos} \qquad (6)$$

Onde $f_i^{\min}(x)$ é o mínimo valor calculado de $f_i(x)$. Este valor é encontrado utilizando:

$$f_i^{max}(x) = \min_{i=1}^{n} f_i(x) \qquad (7)$$

Em geral, muitas decisões práticas possuem vários objetivos conflitantes e não mensuráveis. Os procedimentos anteriores representam estes diferentes objetivos em um denominador comum (Carvalho, 2006).

Um dos métodos mais utilizados na procura da solução de compromisso é o apresentado por Gershon e Duckstein (1983). O objetivo do ajuste da programação é achar a solução com a menor discrepância em relação à solução ideal, a qual é improvável. A Equação (8), formulada por Gershon e Duckstein (1983) é a seguinte:

$$l_p(x) = \left[\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^p \left| \frac{f_i^{max}(x) - f_i(x)}{f_i^{max}(x) - f_i^{min}(x)} \right|^p \right]^{1/p} \qquad (8)$$

onde:

- $l_p(x)$: distância da opção x até a solução ideal utilizando a métrica p.
- α_i : peso referente a discrepância entre as soluções ideal e real de cada critério i.
- $f_i(x)$: valor da alternativa x para o critério i.
- $f_i^{\max}(x)$: os melhores valores no conjunto dos f_i (x);
- $f_i^{\min}(x)$: os piores valores no conjunto dos f_i (x);
- p = o peso referente aos desvios máximos no ajuste matemático da função. $1 \leq p \leq \infty$.

2 METODOLOGIA E DADOS UTILIZADOS

No presente trabalho, para realizar a hierarquização das opções, se utiliza a combinação de dois métodos da análise multicritério: o método da ponderação e a programação compromisso. O primeiro deles foi utilizado para combinar os subcritérios formadores de cada critério avaliado, e o método da programação compromisso foi empregado para determinar a prioridade final de cada

opção, mediante a avaliação conjunta dos critérios considerados.

Nesta seção se apresentam os principais dados do estudo de caso utilizado para ilustrar o método, assim como os critérios avaliados e a metodologia empregada na elaboração deste documento.

2.1 Fontes de dados do presente trabalho

As principais informações utilizadas neste trabalho foram obtidas a partir dos estudos de pré-viabilidade de 18 Mini Centrais Hidrelétricas na Nicarágua, com potência instalada inferior a 1 Megawatt, e situados nas regiões Norte e Central deste país da América Central. Estes estudos foram realizados pela Associação de Trabalhadores para Desenvolvimento Rural Benjamin Linder (ATDR-BL, 2002). Estes estudos incluem os seguintes dados que foram utilizados no estudo de caso:

- Posição geográfica dos aproveitamentos e distância mínima até a rede nacional.
- Comunidades atendidas incluindo número de casas e características da demanda.
- Curvas de permanência hidrológica e características geográficas.
- Usos produtivos a serem implantados e características de demanda.
- Volume projetado do reservatório.

Além destes estudos de pré-viabilidade, outras fontes importantes de dados são as seguintes:

- **VIII Censo de População e IV de Vivenda:** Realizado pelo Instituto Nacional de Estadísticas e Censos (INEC, 2006) entre 28 de maio e 11 de junho de 2005, o "VIII Censo de Población y IV de Vivienda", efetuado para todo o território nicaragüense, apresenta os dados em diferentes níveis de detalhe e para várias relações entre variáveis, considerados como básicos e de uso generalizado para servir como resposta oportuna às necessidades de informação ao maior número de usuários, sobre a população, as vivendas e famílias nicaragüenses.

- **Ministério de Saúde – Nicarágua (MINSA), Dados de estabelecimentos de Saúde:** Entre os meses de Agosto e Outubro de 2001, foi realizada uma pesquisa titulada "Encuesta de establecimientos de salud" (MINSA, 2002). Foi aproveitada a seguinte informação contida nesse documento:
  - Mapas com posição geográfica dos estabelecimentos de saúde.
  - Informação de tipo de estabelecimento de saúde (hospital, clínica, etc.).

- **Ministério de Educação – Nicarágua, Pontos de Localização de estabelecimentos escolares (2008):** Informação georeferenciada relacionada à infra-estrutura escolar da Nicarágua, fornecido pelo Ministério de Educação (MINED, 2008). Dados a utilizar no estudo de caso:
    - Base de dados georeferenciada com a posição geográfica dos centros escolares das áreas na vizinhança dos aproveitamentos hidrelétricos propostos
    - Informação de tipo de estabelecimentos escolares (disponíveis: educação infantil, ensino fundamental e ensino médio).

2.2 Critérios, subcritérios e metodologia utilizada

No presente trabalho, os dados utilizados na hierarquização dos projetos mediante programação compromisso compreendem oito categorias (ou subcritérios):

1. Energia mínima demandada para cada projeto em Megawatt-hora/ano (MWh/a)
2. Distância mínima do sistema até a rede nacional em quilômetros (km)
3. Volume do reservatório em m³
4. Permanência natural da vazão máxima ($Q_{máx}$) utilizável, em % do tempo
5. Taxa de ocupação do município para população maior de 10 anos
6. Quantidade de empregos a serem gerados
7. Ponderadores de benefício – Educação
8. Ponderadores de benefício – Saúde

Estas categorias por sua vez compõem os quatro critérios avaliados:

1. Critério de demanda de energia,
2. Critério econômico
3. Critério social
4. Critério permanência hidrológica.

A forma em que os subcritérios e critérios foram organizados para o presente estudo de caso é descrita na Tabela 1.

O critério energia está formado pelos subcritérios de energia mínima demandada para cada projeto e a distância mínima do sistema até a rede elétrica nacional. O cálculo da energia mínima demandada para cada projeto foi realizado com base nos parâmetros de demanda indicados nos estudos de pré-viabilidade disponíveis (ATDR-BL, 2002). A informação relacionada à distância até a rede nacional foi obtida também da mesma fonte de dados, priorizando aqueles projetos mais

afastados da rede, e este valor se indica na Tabela 2.

Tabela 1 – Organização dos critérios e subcritérios avaliados no estudo de caso.

Critérios	Subcritérios incluídos	Fonte dos Dados
ENERGIA	Energia mínima demandada para cada projeto	ATDR-BL (2002)
	Distância mínima do sistema até a rede nacional	ATDR-BL (2002)
HIDROLÓGICO	Volume do reservatório	ATDR-BL (2002)
	Permanência natural da vazão máxima utilizável	ATDR-BL (2002)
ECONÔMICO	Taxa de ocupação do município	INEC (2005)
	Quantidade de empregos a serem gerados	Valor ilustrativo
SOCIAL	Ponderadores de benefício – Educação	MINED (2008)
	Ponderadores de benefício – Saúde	MINSA (2002)

Os subcritérios de volume do reservatório e permanência natural da vazão máxima utilizável para geração de energia são os indicadores utilizados para formar o critério de permanência hidrológica. Neste caso será dada preferência àqueles projetos com menor volume de reservatório e maior permanência de vazão, para minimizar os possíveis efeitos negativos ao ambiente e minimizar o risco de falha no atendimento. A informação relacionada com estes subcritérios procede dos estudos de pré-viabilidade utilizados no presente trabalho (ATDR-BL, 2002), e os valores a serem utilizados na análise multicritério são apresentados na Tabela 2.

Para formar o critério econômico ou produtivo, foi utilizada informação referente à taxa de ocupação do município ao qual pertencem as comunidades beneficiadas, e a quantidade de empregos que podem ser gerados pelas indústrias se o projeto for realizado. Utilizando informação disponível no VIII censo de população (INEC, 2006) da Nicarágua, no volume IV que descreve a população por municípios, foi utilizada como indicador da taxa de ocupação, a percentagem de população maior de 10 anos com emprego dos municípios em que se situam as comunidades. No caso do subcritério de empregos a serem gerados, foi utilizado, por falta de maior informação disponível, valores ilustrativos estimados pelo autor para cada tipo de indústria. Na Tabela 2 apresentam-se os valores utilizados para avaliar estes subcritérios. Para este critério, será dada prioridade aos projetos que gerem maior quantidade de empregos e pertençam a municípios com menor taxa de ocupação, com o intuito de favorecer o crescimento econômico da região.

No caso do critério social, foram utilizados como indicadores, a existência na região de infra-estrutura pertencente aos setores saúde e educação, devido que isto favorece o desenvolvimento sustentável das comunidades. Duas razões para considerar a utilização estes dados como indicadores do critério social são:

- Geralmente, os recursos disponíveis para construção de projetos de eletrificação devem concorrer inicialmente com projetos de saúde, educação, caminhos de acesso e outras necessidades, tendo todos eles por objetivo o desenvolvimento das comunidades. Assim, se a região já possui infra-estrutura de interesse social, é provável que garantir sua sustentabilidade seja mais fácil mediante a construção de um sistema de eletrificação.
- Principalmente no caso dos estabelecimentos de saúde, o serviço elétrico permite um melhor atendimento e conservação de remédios, drogas e equipamento.

Com base no método apresentado por Kaijuka (2005), e com o intuito de refletir a importância da existência de infra-estrutura escolar e de saúde na área, utilizam-se no presente trabalho estes dois subcritérios, os quais se detalham a seguir:

1. Ponderadores de benefício para centros educativos: Na quantificação dos valores correspondentes aos ponderadores de benefício para escolas, a informação utilizada é obtida dos dados georeferenciados fornecidos pelo MINED (2008), a qual inclui o tipo de centro educativo e quantidade de matrículas, para ensino pré-escolar, fundamental e ensino médio. Utilizando a metodologia apresentada por Kaijuka (2005) para quantificar o benefício (indicado em unidades) de cada centro são utilizadas as seguintes equações em função do tipo de ensino:

   - Ensino pré-escolar e fundamental: $8 + 0.015 * \text{número_de_alunos}$ (9)
   - Ensino médio: $12 + 0.025 * \text{número_de_alunos}$ (10)

2. Ponderadores de benefício para centros de saúde: Para quantificar o valor dos ponderadores de benefício para centros de atendimento médico, a informação utilizada é obtida dos mapas incluídos no documento "Encuesta de establecimientos de salud" (MINSA, 2002). Nestes mapas se indica a localização e tipo para cada centro de saúde. Foi solicitada, mas não foi possível obter informação quantitativa de maior relevância. Contudo, utilizando a informação disponível nos mapas do documento publicado pelo MINSA (2002), e ajuda de pessoas no Instituto Nicaragüense de Estudos Territoriais, foi possível construir uma base de dados georeferenciada indicando a posição e tipo de centro de saúde, para as regiões

próximas dos projetos analisados. Para atribuir valores segundo o tipo de centro, o valor médio utilizado (em unidades) é obtido a partir do trabalho realizado por Kaijuka (2005):

$$\text{Ponderador_Saúde} = \begin{cases} 11 & \text{se} \quad \text{tipo} = \text{Posto_de_saúde} \\ 30 & \text{se} \quad \text{tipo} = \text{Centro_de_saúde_sem_camas} \\ 70 & \text{se} \quad \text{tipo} = \text{Centro_de_saúde_com_camas} \\ 160 & \text{se} \quad \text{tipo} = \text{Hospital} \end{cases} \tag{11}$$

Para que o valor correspondente a cada centro seja incluído dentro deste cálculo, a escola ou centro de saúde deverá estar dentro de um raio máximo de 10 km a partir das comunidades beneficiadas associadas a cada MCH analisada. Este valor de 10 km achou-se razoável e foi extraído do estudo "Municipios Saludables" (OPS, 1998?) realizado pela Organização Pan-americana da Saúde (OPS). Esta análise simplificada utilizando um raio de influência poderia ter sido aprimorada em função de maior disponibilidade de dados, por exemplo, avaliando condições de caminhos de acesso até os centros de saúde. Os resultados obtidos se apresentam na Tabela 2.

Com relação aos parâmetros α_i (peso referente à discrepância entre as soluções ideal e real de cada critério *i*) e *p* (peso referente aos desvios máximos no ajuste matemático da função) da Equação (8) da programação compromisso, os valores utilizados será de 1 para todos os α_i, o que significa que todos os critérios consideram-se de igual importância a falta de evidência que indique o contrário, e para *p* será utilizado o valor de 2, utilizando a distância euclidiana até a solução ideal.

Com o intuito de refletir a importância relativa de cada projeto, priorizando aqueles localizados a menor distância da solução ideal, foi realizada uma última padronização das opções. Esta padronização facilita a aplicação dos algoritmos de otimização utilizados na seleção dos projetos, por exemplo, o problema da mochila, que recebe este nome devido ao modelo de uma situação em que é preciso colocar em uma mochila objetos de diferentes pesos e valores, com o objetivo de preencher a mochila com o maior valor possível, não ultrapassando o peso ou volume máximo (Gabriel *et al*., 2006).

Além dos dados antes mencionados de cada subcritério, na Tabela 2 apresenta-se a preferência (maximizar ou minimizar) para cada subcritério, assim como os valores mínimos e máximos em função desta escolha.

2.3 Condições avaliadas

Com o propósito de explicar melhor os procedimentos descritos neste documento, os pesos de cada subcritério dentro do respectivo critério foram assumidos pelo autor para cada um deles e se apresentam no conjunto de dados da Tabela 2.

O valor da função ponderada de cada opção para cada critério será então calculado pela Equação:

$$f(x,i) = \sum^{j} w_j * f^*(x,j) \qquad (12)$$

onde:

- $f(x,i)$: Valor da função ponderada da opção x para o critério i.
- $f^*(x,j)$: Valor padronizado do subcritério j correspondente à opção x.
- w_j: Peso do subcritério j, somente se $j \epsilon i$.

Tabela 2 – Valores de cada subcritério utilizados no estudo de caso

Critério	***Energia***		***Hidrológico***		***Econômico***		***Social***	
PESO[3]	**75%**	**25%**	**50%**	**50%**	**25%**	**75%**	**50%**	**50%**
MCH	**Energia (MWh/a)**[1]	**Distância (km)**[1]	**Reserva. (m^3)**[1]	**Perman. natural (%)**[1]	**Ocupação (%)**[2]	**Emprego (unid.)**[3]	**PB Educação (unid.)**[4]	**PB Saúde (unid.)**[5]
1	1793.658	8	1000	87.25%	45.64%	220	887	377
2	1435.661	2	1800	66.38%	45.64%	77	903	377
3	866.872	82	6000	51.71%	37.64%	80	180	22
4	1354.268	40	500	95.00%	41.63%	124	884	114
5	710.406	2	1000	75.50%	39.75%	140	887	111
6	2899.27	1	1000	95.00%	41.09%	90	691	122
7	3056.934	34	8000	68.40%	40.05%	189	171	22
8	2095.924	10	1000	95.00%	41.25%	195	759	44
9	2095.924	10	1000	95.00%	41.25%	195	759	44
10	1892.84	5	4000	55.71%	46.21%	225	328	33
11	1681.906	8	1000	94.41%	46.21%	235	270	11
12	1325.829	62	10000	69.20%	45.32%	98	79	11
13	1886.209	47	1000	95.00%	43.40%	0	72	11
14	1637.631	58	800	95.00%	43.75%	197	125	0
15	1775.407	80	1000	95.00%	43.75%	168	111	0
16	918.374	110	15000	51.57%	43.75%	111	18	11
17	6267.576	90	65000	56.43%	43.75%	247	505	241
18	3776.487	100	1000	95.00%	43.66%	269	76	22
Preferir:	Maximiza	Maximiza	Minimiza	Maximiza	Minimiza	Maximiza	Maximiza	Maximiza
$f_i^{\min}(x)$	710.406	1	65000	51.57%	46.21%	0	18	0
$f_i^{\max}(x)$	6267.576	110	500	95.00%	37.64%	269	903	377

(Fontes: [1] ATDR-BL, 2002; [2] INEC, 2006; [3] Assumidos pelo autor; [4] MINED, 2008; [5] MINSA, 2002)

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para permitir a análise conjunta de parâmetros com grandezas diferentes, o primeiro passo que deve ser realizado e a padronização inicial destes valores, segundo a Equação (5). Para os dados do estudo de caso os resultados deste processo apresentam-se na Tabela 3. Uma vez feita esta padronização, se calcula o valor da função ponderada para cada critério, multiplicando os valores indicados na Tabela 3 pelo peso dos subcritérios que conformam cada critério.

Tabela 3 – Valores padronizados de cada subcritério

Critério	***Energia***		***Hidrológico***		***Econômico***		***Social***	
MCH	**Energia**	**Distância**	**Reserva.**	**Perman.**	**Ocupação**	**Emprego**	**PB Educação**	**PB Saúde**
1	0.195	0.064	0.992	0.822	0.067	0.818	0.982	1.000
2	0.131	0.009	0.980	0.341	0.067	0.286	1.000	1.000
3	0.028	0.743	0.915	0.003	1.000	0.297	0.183	0.058
4	0.116	0.358	1.000	1.000	0.534	0.461	0.979	0.302
5	0.000	0.009	0.992	0.551	0.754	0.520	0.982	0.294
6	0.394	0.000	0.992	1.000	0.597	0.335	0.760	0.324
7	0.422	0.303	0.884	0.388	0.719	0.703	0.173	0.058
8	0.249	0.083	0.992	1.000	0.579	0.725	0.837	0.117
9	0.249	0.083	0.992	1.000	0.579	0.725	0.837	0.117
10	0.213	0.037	0.946	0.095	0.000	0.836	0.350	0.088
11	0.175	0.064	0.992	0.986	0.000	0.874	0.285	0.029
12	0.111	0.560	0.853	0.406	0.104	0.364	0.069	0.029
13	0.212	0.422	0.992	1.000	0.328	0.000	0.061	0.029
14	0.167	0.523	0.995	1.000	0.287	0.732	0.121	0.000
15	0.192	0.725	0.992	1.000	0.287	0.625	0.105	0.000
16	0.037	1.000	0.775	0.000	0.287	0.413	0.000	0.029
17	1.000	0.817	0.000	0.112	0.287	0.918	0.550	0.639
18	0.552	0.908	0.992	1.000	0.298	1.000	0.066	0.058

Uma vez obtidos os valores da função ponderada para cada critério, é possível utilizar a Equação apresentada por Gershon e Duckstein (1983), para calcular a distância até a solução ideal mediante programação compromisso, como indicado na Equação (8).

Como foi mencionado anteriormente, o valor utilizado para todos os α_i será de 1, e para p será empregado o valor de 2, dando como resultado a distância euclidiana até a solução ideal para cada uma das opções avaliadas.

Este valor da distância é suficiente critério de escolha quando o objetivo é selecionar somente a melhor alternativa entre um conjunto, sendo a menor distância correspondente à melhor opção. Mas, se o objetivo é selecionar um conjunto de alternativas sujeito a restrições de disponibilidade de recursos, por exemplo, no caso de aplicar o algoritmo da mochila, resulta muito útil aplicar o conceito de indicador de benefícios, padronizando estes valores, mediante o uso da Equação (13):

$$L(x)^* = \frac{l_p(x) - l_p^{max}(x)}{l_p^{min}(x) - l_p^{max}(x)} + 0.1 \quad (13)$$

onde:

- $L(x)^*$: Valor padronizado da distância determinada mediante programação compromisso.
- $l_p(x)$: Distância da opção x até a solução ideal utilizando a métrica p.
- l_p^{max}: Máxima distância até a solução ideal entre o conjunto de opções
- l_p^{min}: Mínima distância até a solução ideal entre o conjunto de opções

Os resultados obtidos da aplicação desta Equação são apresentados na Tabela 4. Esta padronização permite refletir a importância relativa de cada projeto, priorizando aqueles localizados a menor distância da solução ideal, para facilitar o emprego dos algoritmos de otimização utilizados na seleção dos projetos. Estes valores padronizados foram acrescentados em 0.1 a para que todas as opções possam ser consideradas dentro de um algoritmo de otimização (para que todos os valores padronizados sejam maiores que zero, neste caso, em um intervalo $0.1 \leq L(x)^* \leq 1.1$).

Tabela 4 – Distância por programação compromisso, prioridade padronizada e hierarquia dos projetos analisados

MCH	Distância programação compromisso	Indicador de prioridade relativa padronizado	Hierarquia
1	0.878	1.100	1
2	1.254	0.556	13
3	1.402	0.343	15
4	1.008	0.911	5
5	1.141	0.719	8
6	1.011	0.908	6
7	1.152	0.703	9
8	0.965	0.975	2 (3)
9	0.965	0.975	2 (3)
10	1.280	0.519	14
11	1.226	0.597	10
12	1.475	0.237	16
13	1.570	0.100	18
14	1.234	0.586	12
15	1.228	0.594	11
16	1.510	0.186	17
17	1.085	0.801	7
18	1.007	0.913	4

4 CONCLUSÕES

Por meio da programação compromisso e técnicas de análise multicritério, foi possível estabelecer a hierarquia e valores de prioridade relativos para cada um dos projetos do estudo de caso, avaliando simultaneamente quatro critérios: demanda de energia, hidrológico, econômico e social. A utilização da análise multicritério permitiu a avaliação integrada de todos estes critérios de grandezas diferentes, os quais dificilmente poderiam ter sido transformados de modo objetivo a uma unidade de medida em comum, por exemplo, valores financeiros.

A padronização das distâncias determinadas mediante programação compromisso facilita a seleção de um conjunto de projetos por meio da aplicação de procedimentos como o algoritmo da mochila, atribuindo maior valor às opções mais próximas da solução ideal, sem afetar a proporcionalidade entre os resultados obtidos.

Os procedimentos apresentados neste trabalho podem ser aplicados no processo de tomada de decisão de outros tipos de projetos relacionados com o aproveitamento dos recursos hídricos, por exemplo: obras de irrigação, projetos de recreação, construção de portos fluviais e marítimos, etc.

Os parâmetros utilizados para definir prioridades mediante programação compromisso foram selecionados por serem indicadores representativos dos critérios avaliados. Outros dados podem ser acrescentados à análise em função da disponibilidade de informações e com base na opinião do tomador de decisão. Entanto, é recomendável que os parâmetros a serem utilizados satisfaçam os critérios básicos mencionados pelo Habitat Conservation Trust Fund – (HCTF, 2003) e citados por Chaves e Alipas (2007) os quais devem ser: disponíveis, compreensíveis, acreditáveis, relevantes e integradores.

BIBLIOGRAFIA

ASOCIACIÓN DE TRABAJADORES DE DESARROLLO RURAL – BENJAMÍN LINDER. (2002). *"Estudio de potencial de generación hidroeléctrica a pequeña escala y pre-factibilidad técnico-financiera de 30 sitios con potencial hidroeléctrico"*. Nicaragua.

CARVALHO, F.S. (2006). *"Localização de reservatórios através de técnicas de otimização em ambiente de geoprocessamento: estudo de caso na bacia do rio Coruripe, em Alagoas"*. Dissertação (Mestrado Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 125 p.

CHAVES, H.M.L.; ALIPAZ, S. (2007). *"An integrated indicator based on basin hydrology, environment, life, and policy: the watershed sustainability index"*. Water Resources Management, V. 21, N. 5, pp. 883-895.

COHON, J. L. (1978). *Multiobjective programming and planning*. Academic Press, New York, 333 p.

COHON, J. L.; MARKS, D.H. (1975). *"A review and evaluation of multiobjective programming techniques"*. Water Resources Research, V. 11, N. 2, pp. 208-220.

DUCKSTEIN, L.; OPRICOVIC, S. (1980). *"Multiobjective optimization in river basin development"*. Water Resources Research, V. 16, N. 1, pp. 14-20.

GABRIEL, S. A.; KUMAR, S., ORDOÑEZ, J.; NASSERIAN, A. (2006). *"A multiobjective optimization model for project selection with probabilistic considerations"*. Socio-Economic Planning Science, V. 40, pp. 297-313.

GARTNER, I.R. (2001). *Avaliação ambiental de projetos em bancos de desenvolvimento: evidências e propostas*. Ed. Universa/Universidade Católica de Brasília, Brasília, 229p.

GERSHON, M.; DUCKSTEIN, L. (1983). *"Multi objective approaches to river basin planning"*. J. Water Resources Planning Management, V. 109, N. 1, pp. 13-28.

HABITAT CONSERVATION TRUST FUND. (2003). *Mission creek sustainable watershed indicators workbook*. British Columbia, pp. 22.

INSTITUTO NICARAGÜENSE DE ESTADÍSTICAS Y CENSOS. (2006). *"Población: Características Generales"* in CENSO 2005: VIII Censo de Población y IV de Vivienda, Nicaragua, V. 1., pp. 15-16.

KAIJUKA, E. (2005). *"GIS and Rural Electricity Planning in Uganda"*. Journal of Cleaner Production, V. 15, N. 2, pp. 203-217.

MINISTERIO DE EDUCACION – NICARAGUA: División de Infraestructura Escolar. (2008). *"Puntos de localización de establecimientos escolares de los departamentos de Nueva Segovia, Jinotega, Matagalpa, Boaco, RAAN y RAAS"*. Manágua, 1CD.

MINISTERIO DE SALUD – NICARAGUA. (2002). *Encuesta de establecimientos de salud - Nicaragua 2001: informe preliminar*. Nicaragua.

NIJKAMP, P.; SPRONK, J. (1979). *"Analysis of production and location decisions by means of multi-criteria analysis"*. Engineering and Process Economics, V. 4, pp. 285-302.

ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD. (1998?). *"Municipios saludables – Camoapa, Boaco"*. Manágua. Disponível em: <http://www.bvsde.org.ni/web_textos /BVSDE/INIFOM/CD02/Caracterizaciones/Boaco/Camoapa.html> . Acesso em: 30 jun. 2008.

PORTO, R.; LANNA, A.; BRAGA Jr., B.; CIRILO, J.; FILHO, K.; AZEVEDO, L.; CALVO, L.; De BARROS, M.; BARBOSA, P. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos*. ABRH, Porto Alegre. 420 p.

RAJU, K.S.; PILLAI, C.R.S. (1999). *"Multicriterion decision making in river basin planning and development"*. European Journal of Operational Research**,** V. 112, N. 2, pp. 249-257.

VILAS BOAS, C. L. de. (2005). *"Análise da aplicação de métodos multicritérios de decisão na gestão de recursos hídricos"* in Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa. ABRH, 1 CD.

YU, P. (1973). *"A class of decisions for group decision problems"*. Management Science, V. 19, pp. 936.

ZELENY, M. (1974). *"A concept of compromise solutions and the method of the displaced ideal"*. Computers and Operations Research**,** V. 1, pp. 479-496.