

Alocação Quali-quantitativa de Águas em Bacias Hidrográficas: Metodologia Multiobjetivo Inserida no Contexto da Gestão dos Recursos Hídricos

Érica Cristine Medeiros Nobre Machado, Carlos de Oliveira Galvão

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

erica@ccta.ufcg.edu.br; galvao@dec.ufcg.edu.br

Francisco de Assis de Souza Filho

Universidade Federal do Ceará- UFC

assis@ufc.br

Recebido: 30/06/11 - revisado: 02/10/11 - aceito: 02/01/12

RESUMO

No Brasil, os critérios de determinação da vazão outorgável são bastante restritivos, o que provoca descontentamentos e gera conflitos entre os usuários, especialmente em bacias que já apontam para o esgotamento dos seus recursos hídricos outorgáveis. Esta alocação de água tradicional, baseada apenas em critérios quantitativos, não é mais suficiente; é necessário considerar múltiplos e conflitantes objetivos, o comportamento estocástico das variáveis hidrológicas e as incertezas associadas, o que torna os modelos de alocação cada vez mais complexos. Este trabalho apresenta uma metodologia para alocação quali-quantitativa da disponibilidade hídrica superficial excedente em uma bacia hidrográfica, considerando múltiplos objetivos e restrições, múltiplos usos, e, facilmente adaptável para cenários de racionamento (vazão excedente nula ou negativa). É proposta a otimização da alocação da água através de um algoritmo evolucionário multiobjetivo no qual foram inseridas adaptações e operadores de reprodução desenvolvidos especificamente para incorporar as restrições do problema e contornar os obstáculos apresentados. A metodologia foi avaliada na bacia hidrográfica do Rio Gramame, segundo dois cenários hipotéticos de previsão probabilística de precipitação: um com previsão de precipitação acima da média histórica e outro abaixo da média histórica. Em ambos os casos houve convergência do algoritmo evolucionário para as regiões mais favoráveis da Fronteira de Pareto, sugerindo no primeiro caso, soluções com menores ocorrências de alarmes, e, no segundo caso soluções totalmente viáveis sob todas as restrições consideradas.

Palavras-chave: Alocação de água. Critérios de Outorga. Algoritmos Evolucionários.

INTRODUÇÃO

Apesar de ser um problema clássico, a alocação de água continua a ser um desafio a gestores, usuários e pesquisadores, principalmente devido ao aumento de conflitos resultantes da disputa pelo seu uso, provocados pelo aumento progressivo da demanda em um cenário de escassez relativa cada vez mais evidente. Quando utilizada para mediar conflitos e auxiliar os usuários, tomadores de decisão e gestores de recursos hídricos, a alocação de água requer uma abordagem interdisciplinar e multiobjetiva, considerando, além dos critérios econômicos, aspectos ambientais, sociais e tecnológicos. Além disso, algumas especificidades desse processo o tornam mais complexo, como as incertezas associadas ao comportamento aleatório dos eventos hidrológi-

cos e conseqüente ocorrência da água na natureza (Stuart e Campos, 2001).

A outorga de direito de uso da água é o instrumento legal de alocação entre os diversos usos da bacia hidrográfica. Este instrumento visa uma distribuição da água de modo a atender as necessidades ambientais, econômicas e sociais, reduzir ou eliminar conflitos entre usuários e possibilitar o atendimento das demandas futuras (Silva e Monteiro, 2004). Contudo, os critérios de determinação da vazão outorgável comumente utilizados são bastante restritivos, provocando descontentamentos e gerando escassez (e conflitos) de segunda ordem, que é aquela decorrente da incapacidade da sociedade em encontrar ferramentas sociais adequadas para lidar com a escassez do recurso natural (Ohlsson, 1999; Vieira e Ribeiro, 2010).

Segundo estes critérios, como na maior parte do tempo as vazões naturais nos rios ou regulari-

zadas pelos reservatórios são superiores às vazões de referência e, como o que é outorgado é uma fração delas, o que ocorre, na prática, são vazões bem maiores ao longo do ano (Silva e Monteiro, 2004). Dessa forma, a outorga atua como fator limitante do quantitativo disponível a ser alocado, principalmente em bacias que já apontam para o esgotamento dos seus recursos hídricos outorgáveis.

A utilização da vazão de referência baseada no critério exposto apresenta como vantagem a simplicidade de sua implementação e a minimização dos riscos de falhas no atendimento das demandas, cuja garantia de atendimento ou de permanência é necessária para que os usuários possam realizar um melhor planejamento de suas atividades e investimentos em seus empreendimentos. Por outro lado, este procedimento pode limitar o crescimento dos empreendimentos usuários da água da bacia, gerar descontentamentos e aumentar o conflito pelo uso da água, visto que, na maior parte do tempo, as vazões naturais nos rios ou regularizadas pelos reservatórios serão superiores às vazões outorgadas (Lanna *et al.*, 1997; Lima *et al.*, 2005).

Esta vazão excedente poderia ser alocada entre os usuários, minimizando os prejuízos decorrentes da não utilização desta. Esta alocação pode ser realizada anualmente, de modo a considerar a variabilidade interanual das variáveis hidrológicas, servindo, portanto, como um ajuste na outorga de longo prazo. Ainda é possível que ocorram períodos extremos prolongados, secos ou úmidos, devido à variabilidade decenal das variáveis hidrometeorológicas. Logo, a alocação desta parcela variável da disponibilidade hídrica surge ainda com uma estratégia de adaptação à variabilidade climática.

Desenvolver um sistema de apoio à decisão para alocação da vazão excedente, considerando todas estas variáveis, não é tarefa fácil. Esta complexidade advém inicialmente da necessidade de se prever com antecedência, envolvendo os mínimos riscos possíveis, a própria vazão excedente para o ano em análise, permitindo aos usuários o planejamento da utilização do aporte excedente alocado. Logo, é necessário que esta alocação seja precedida de uma previsão hidrometeorológica. Além disso, a abordagem deve ser multicriterial e multiobjetiva, de modo a atender os objetivos técnicos, ambientais, sociais, econômicos, legais e de eficiência do uso da água. Também é importante que a abordagem citada esteja integrada aos instrumentos de gestão dos recursos hídricos, de modo a suprir as lacunas existentes sem violar os critérios e preceitos estabelecidos em lei.

Este trabalho propõe um modelo multiobjetivo de alocação da vazão excedente em bacias hidrográficas, considerando diferentes usos, consuntivos e de diluição, e, conseqüentemente, a outorga de quantidade e de qualidade da água. Este modelo foi desenvolvido com o propósito de ser facilmente acoplado a outros que representem a modelagem hidrometeorológica da bacia hidrográfica, podendo compor um sistema de apoio à decisão de alocação do volume excedente, em períodos em que as vazões forem superiores à outorgável, ampliando a produção de riquezas sociais. Além da promoção do uso mais eficiente da disponibilidade hídrica, através da ampliação dos volumes outorgados, o modelo proposto também pode ser utilizado em cenários de escassez, definindo o volume de racionamento para cada usuário.

METODOLOGIA

Visão geral do modelo de alocação proposto

Para se alocar de forma eficiente e segura a vazão excedente é necessário o envolvimento e a integração de inúmeras variáveis e modelos que representem os processos envolvidos, os quais podem variar em complexidade e níveis de detalhamento; e da consideração de múltiplas funções objetivo e restrições, muitas das quais não numericamente quantificáveis. Muitos destes modelos são, por si só, demasiadamente complexos quanto à tentativa de modelar o comportamento estocástico das variáveis envolvidas e as inúmeras incertezas associadas. Este é um desafio que tem despertado a atenção de muitos pesquisadores recentemente (Yang *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009a; Wang *et al.*, 2009b; Zhang *et al.*, 2010a; Zhang *et al.*, 2010b).

Desta forma, propõe-se neste trabalho a utilização de um modelo de otimização da alocação utilizando algoritmos evolucionários. Estes algoritmos, de forma geral, são facilmente adaptáveis a outros modelos, posto que utilizam apenas informações da função objetivo e da aptidão das soluções; além de ser capazes de otimizar funções objetivo com superfícies complexas, reduzindo a incidência de mínimos locais, ser menos suscetíveis à forma ou continuidade da Fronteira de Pareto e ser flexíveis para trabalhar com restrições qualitativas (Coello, 2006).

Além disso, a escolha de um algoritmo evolucionário para a otimização da alocação da água em bacias hidrográficas torna-se adequado devido à: capacidade de adaptabilidade e conectividade com

os demais modelos envolvidos; possibilidade de considerar múltiplos objetivos e restrições, com ordem de grandeza distinta e alguns de caráter apenas qualitativo; possibilidade de utilizar diretamente o conceito de otimalidade de Pareto, onde poderão ser encontradas múltiplas soluções otimizadas, as quais podem servir de cenários para decisões no âmbito de um comitê de bacia; utilização de regras de transição probabilísticas, em lugar de determinísticas, permitindo, dessa forma, avaliar inúmeros cenários e possibilidades simultaneamente, reduzindo os riscos naturalmente decorrentes das inúmeras incertezas envolvidas; possibilidade de hibridização com outro método de otimização ou com um sistema de apoio à decisão, onde soluções já conhecidamente viáveis, obtidas a partir da experiência adquirida na bacia ou de outros métodos de otimização podem ser facilmente inseridas no algoritmo evolucionário.

Contudo, os métodos evolucionários multi-objetivo como originalmente concebidos geralmente assumem que o problema de otimização está livre de qualquer restrição quando, na verdade, a otimização de problemas reais envolve uma série de restrições que precisam ser atendidas para que a solução seja considerada aceitável. Estas restrições tornam o processo de otimização mais complexo devido às limitações que impõem às variáveis de decisão e às interrelações entre essas restrições e as funções objetivo (Venkatraman e Yen, 2005); além de reduzir consideravelmente o espaço de busca, tornando altamente difícil, na maioria dos casos, encontrar uma única solução viável.

No problema proposto, as diversas restrições envolvidas são variáveis em complexidade e nível de detalhamento. Devido à fragilidade das tradicionais técnicas de tratamento das restrições para este caso, segue-se neste trabalho a estratégia de se modificar os operadores de reprodução e de seleção tradicionais para melhorar o desempenho dos algoritmos evolucionários (Montesinos *et al.*, 1999; Dandy *et al.*, 1996), inclusive introduzindo conhecimentos específicos do problema nestes operadores (Becerra e Coello, 2005). No caso específico deste artigo, por exemplo, este conhecimento foi traduzido em forma de restrições (ou alarmes) que classificam os indivíduos em viáveis ou inviáveis, com tratamento diferenciado para cada restrição de modo a acelerar a obtenção de soluções livres de restrições.

Dessa forma, são utilizados operadores direcionados e inseridas adaptações em um método evolucionário multiobjetivo, com o intuito de incorporar de forma eficiente e eficaz as restrições e contornar os obstáculos apresentados.

Representação da solução

No presente problema, temos como variável de decisão o volume adicional alocado para cada usuário para o ano em análise, podendo ser variável mês a mês. A solução de alocação será representada, portanto, através de números reais, em uma matriz bi-dimensional tempo x usuário contendo $n=12$ colunas, uma para cada mês do ano em análise, e nu linhas, uma para cada usuário (Figura 1).

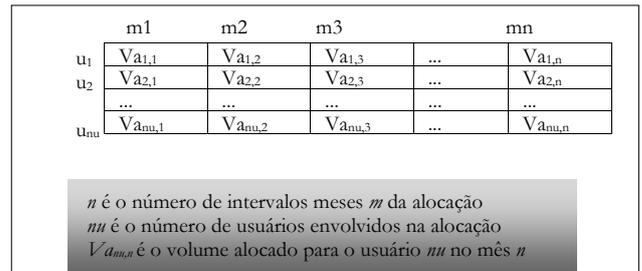


Figura 1 – Representação da solução.

Para geração de cada solução que compõe a população inicial, o volume disponível para alocação em cada trecho, uma vez conhecido, é distribuído através de um fator de proporção, conforme apresentado nas Equações 1 e 2.

$$Va_{u,m} = \min(Vr_{u,m}; p_{u,m} \cdot q_c \cdot Vdc_{c,m}) \tag{1}$$

$$p_{u,m} = \frac{P_{u,m}^*}{\sum_{u=Uini_c}^{Ufim_c} P_{u,m}^*} \tag{2}$$

Onde:

- $Va_{u,m}$ é o volume alocado para o usuário u no mês m ;
- $Vr_{u,m}$ é o volume requerido pelo usuário u no mês m ;
- $p_{u,m}$ é a proporção de alocação do usuário u no mês m ;
- q_c é o coeficiente de alocação para o trecho c ;
- $Vdc_{c,m}$ é o volume disponível no trecho c no mês m ;
- $P_{u,m}^*$ é um número aleatório, contido no intervalo $[0,1]$ gerado para o usuário u no mês m ;
- $Uini_c$ é usuário inicial do trecho c ;
- $Ufim_c$ é usuário final do trecho c .

Observa-se que, apesar de ser obtido a partir de um número aleatório, $P_{u,m}^*$, o fator de proporção é corrigido de modo a distribuir apenas o volume disponível entre os usuários de cada trecho, ou seja, é gerado um novo fator de proporção $p_{u,m}^*$, considerando o fator aleatório gerado em relação ao somatório de todos os fatores aleatórios. Dessa forma, o volume alocado para os usuários de um trecho fica

sempre limitado ao volume disponível. Contudo, não necessariamente todo o volume disponível é distribuído em cada trecho, pois, como se trata de uma alocação integrada espacialmente, é desejável a análise de soluções em que o volume disponível em determinado trecho possa ser distribuído também a usuários dos trechos a jusante. Para isso foi definido o coeficiente de alocação q_c , número aleatório contido no intervalo $[0,1]$ que determina quanto do volume disponível será alocado em cada trecho. Dessa forma, sempre que o coeficiente de alocação for menor do que 1, ou caso o volume alocado pelo fator de proporção resulte maior do que o volume requerido para determinado usuário, ocorrerão sobras do volume disponível.

Em uma alocação integrada na bacia hidrográfica, estas eventuais sobras poderão ser utilizadas pelos usuários dos trechos a jusante. Assim, inicialmente se aloca o volume nos trechos extremos da bacia hidrográfica (em uma alocação das águas superficiais, os rios de ordem 1), para depois, seqüencialmente, realizar a correção dos volumes disponíveis nos trechos a jusante e a posterior definição dos volumes alocados.

Adaptações ao método de otimização

O *Strength Pareto Evolutionary Algorithm 2* – SPEA2 (Zitzler *et al.*, 2001) é considerado componente da segunda geração de métodos evolucionários, os quais apresentam em comum a utilização do conceito de otimalidade de Pareto e de mecanismos para manutenção da diversidade das soluções, herdados da primeira geração, bem como a utilização de alguma técnica elitista e a ênfase na eficiência (Coello, 2006). Como a aptidão dos indivíduos dada pelo método SPEA2 considera apenas os conceitos de dominância e de densidade de vizinhança, a principal adaptação a ele incorporada foi a consideração concomitante destes conceitos com o conceito de viabilidade das soluções.

Para esse propósito, as soluções são categorizadas em viáveis e inviáveis, sendo que as inviáveis são avaliadas, além das funções objetivo, pelas informações do tipo e severidade da restrição violada, sendo essas informações utilizadas posteriormente no processo de seleção, evolução e reprodução dos indivíduos, conforme sugerido por Brasileiro (2005) e Machado (2006). As restrições são classificadas em três níveis: as de baixa severidade, as de média severidade e as de alta severidade. Além disso, para as soluções inviáveis, adota-se o conceito de ponto de falha, que é o instante de tempo (mês) em que ocorre a primeira violação da restrição, ou seja, o

primeiro alarme. Dessa forma, durante a seleção dos indivíduos, utilizando o método do torneio, considera-se que indivíduos inviáveis que possuem ponto de falha maior são mais recomendáveis do que os inviáveis que possuem ponto de falha menor por postergar mais o instante em que alguma restrição será violada.

No preenchimento da população externa, as adaptações foram feitas de modo a sempre priorizar os indivíduos viáveis em relação aos inviáveis e, dentre os inviáveis, priorizar aqueles em que a violação da restrição é de menor severidade ou ocorre mais tardiamente. Dessa forma, em lugar de selecionar as soluções não-dominadas da população para compor a população externa, são selecionadas as soluções viáveis não-dominadas conforme sugerido por Machado (2006) e descrito a seguir: inicialmente se separam os indivíduos viáveis dos inviáveis; depois são avaliadas as relações de dominância em cada subgrupo individualmente, definindo, desta forma, quatro conjuntos: Viáveis Não-Dominados, Viáveis Dominados, Inviáveis Não-Dominados e Inviáveis Dominados.

Após remover todos os indivíduos Viáveis Não-Dominados para a população externa, caso a dimensão desta população não atinja o limite estabelecido, soluções dos outros conjuntos serão selecionadas para preenchê-la, considerando a viabilidade, o critério de dominância, a aptidão das soluções, o ponto de falha e a severidade da restrição. Os critérios são os seguintes: as Soluções Viáveis vêm sempre no topo, ordenadas em ordem crescente de aptidão, seguidas das Inviáveis Não-Dominadas e logo após as Inviáveis Dominadas. Entre as Soluções Inviáveis, consideram-se como mais aptas aquelas que têm o maior valor de ponto de falha, e, em caso de empate, aquelas que violam restrições de menor severidade.

Operadores de reprodução

Assim como a variável de decisão, os operadores de reprodução também são apropriados para variáveis reais. É utilizado o operador aritmético *Crossover Média* (Davis, 1991, *apud* Lacerda e Carvalho, 1999), no qual cada gene do filho gerado é obtido através da média aritmética dos respectivos genes dos indivíduos pais. Ressalte-se que esta operação apenas será aplicada caso seja satisfeita a probabilidade definida para este operador, caso contrário, o filho da reprodução será tomado como uma réplica do melhor entre os dois pais, considerando-se os mesmos critérios do operador por torneio na definição do melhor. A equação 3 mostra a opera-

ção de geração do indivíduo filho quando a probabilidade é atendida ($xcm \leq pbcm$).

$$Va_{u,m}(\text{filho}) = \frac{Va_{u,m}(\text{pai1}) + Va_{u,m}(\text{pai2})}{2} \quad (3)$$

Onde:

xcm é número aleatório gerado, contido no intervalo [0,100], para verificação da aplicação do *crossover* média;

$pbcm$ é a probabilidade do *crossover* média;

$Va_{u,m}(\text{filho})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo filho;

$Va_{u,m}(\text{pai1})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 1;

$Va_{u,m}(\text{pai2})$ é o volume alocado para o usuário u no mês m do indivíduo pai 2.

Após a aplicação do *Crossover* Média, cada filho gerado é submetido, individualmente, ao operador de Mutação Uniforme, que é a simples substituição de um gene por um número aleatório (Lacerda e Carvalho, 1999). Este operador age também restrito a uma probabilidade de aplicação ($pbmu$), avaliada em cada trecho e mês da bacia hidrográfica, sendo que, quando a mesma não é satisfeita, os genes do indivíduo filho referentes aos volumes alocados naquele trecho/mês permanecem inalterados. Caso contrário, quando $xmu > pbmu$, os genes do indivíduo filho serão substituídos pelos genes correspondentes de um indivíduo gerado aleatoriamente, da mesma forma como descrito na geração de indivíduos para preenchimento da população inicial. Contudo, apenas uma parcela da população será submetida à sequência de operações do *Crossover* Média e Mutação Uniforme; outra parcela será submetida ao *Crossover* Média Direcionado e outra à Mutação Direcionada, adaptados de Brasileiro (2005) e Machado (2006), que desenvolveram operadores semelhantes para variáveis binárias na otimização da operação de redes de escoamento de petróleo.

Na parcela que segue para o *Crossover* Média Direcionado, a cada par de pais submetido a este operador, é observada a viabilidade e o ponto de falha mais prematuro entre os dois. Se os dois pais forem viáveis ou se a probabilidade de aplicação deste operador ($pbcd$) não for satisfeita, nenhuma operação é realizada, sendo o indivíduo filho tomado como uma réplica do melhor indivíduo pai. Por outro lado, quando a probabilidade é atendida ($xcd \leq pbcd$), o volume alocado do indivíduo filho até o instante anterior ao ponto de falha mais prematuro é tomado como uma réplica do melhor indivíduo pai, instante a partir do qual o volume alocado é

tomado pela média aritmética dos respectivos valores dos indivíduos pais, tal como o *Crossover* Média Aleatório. O *Crossover* Média Direcionado impõe que a operação seja realizada apenas na parcela inviável do cromossomo, preservando a parcela viável em uma tentativa de acelerar a convergência.

A Mutação Direcionada, assim como a Mutação Uniforme, também é aplicada individualmente a apenas um indivíduo pai. Nesse operador, quando a probabilidade de aplicação não é satisfeita ($xmd > pmd$), ou quando o indivíduo filho não viola nenhuma restrição, o indivíduo filho é tomado como uma réplica do indivíduo pai. Caso contrário, é observado o ponto de falha e o tipo de restrição violada, efetuando ações de reparo específicas para cada restrição, ou seja, alterando o volume alocado, aumentando-o ou diminuindo-o, em intervalos de tempo específicos, no intuito de eliminar a violação da restrição.

A Figura 2 apresenta a seqüência de aplicação dos operadores em cada geração do algoritmo evolucionário para geração de uma nova população, onde CM, CMD, MD e MU significam, respectivamente, *Crossover* Média, *Crossover* Média Direcionado, Mutação Direcionada e Mutação Uniforme.

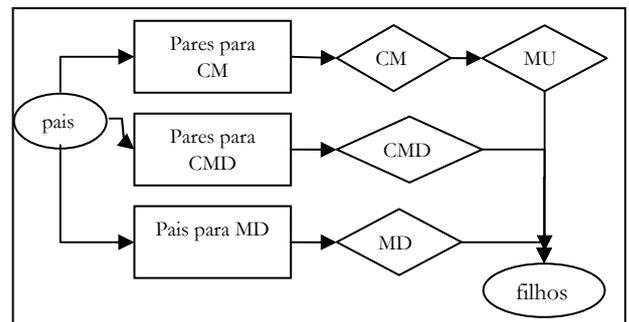


Figura 2 – Seqüência de aplicação dos operadores.

Estrutura do modelo de alocação

Propõe-se a integração do modelo de alocação proposto com os demais modelos necessários em três módulos, assim definidos: O “Módulo de determinação da vazão disponível” a ser alocada, onde podem ser utilizados modelos de previsão de precipitação em conjunto com modelos chuva-deflúvio, de interação rio-aquífero e de operação dos reservatórios para geração da vazão prevista para o período da análise em cada trecho. Esta previsão da vazão é necessária para aumentar a antecedência da preparação do uso vazão excedente.

O “Módulo de otimização multiobjetivo”, objeto deste trabalho, tem como propósito obter soluções de alocação para a vazão disponível obtida no módulo anterior para cada usuário em cada instante de tempo. Este módulo, por sua vez, está em constante comunicação com o “Módulo do balanço hídrico quali-quantitativo integrado”, pois, a cada solução de alocação gerada, a propagação quali-quantitativa da água através da bacia deve ser avaliada, permitindo assim a determinação das restrições violadas e o cálculo das funções objetivo, necessárias para dar continuidade ao processo de otimização.

Quanto às funções objetivo e restrições, propõe-se a representação, nestas, de critérios de ordem técnica, econômica, ambiental, sociais e legais, os quais podem avaliar, por exemplo:

- Técnicos: atendimento do volume adicional requerido pelos usuários, manutenção do nível do reservatório dentro de limites sustentáveis;
- Econômicos: retorno econômico dos empreendimentos resultantes do aporte adicional de água;
- Ambientais: preservação do meio ambiente aquático, racionalidade do uso da água;
- Sociais: quantidade de empregos gerados;
- Legais: atendimento das classes de enquadramento dos corpos hídricos, consideração dos critérios de outorga já utilizados.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Área de Estudo

A aplicação foi conduzida na Bacia Hidrográfica do rio Gramame, situada na região litorânea sul, próxima à capital do Estado da Paraíba. Esta bacia é considerada estratégica para o estado por constituir-se na principal provedora de água para o conglomerado urbano formador da Grande João Pessoa. Seus principais cursos d'água além do principal, o Gramame, são os afluentes Mumbaba, Mamuaba e Água Boa, todos perenes.

A exportação da água da bacia para a cidade de João Pessoa constitui no uso mais significativo da bacia, em torno de 58% (retiradas do riacho Mumbaba e do reservatório Gramame-Mamuaba, principal reservatório fluvial da região litorânea do Estado), seguido da irrigação, com 41 % da demanda total.

A bacia foi dividida em dez regiões, drenadas por um ponto de referência (Figura 3). Em cada ponto de referência foi contabilizada a vazão máxima outorgável, tomada como 90% da vazão de referência estimada pelo Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia (PARAÍBA, 2000), e o somatório das vazões já outorgadas. Para o trecho a jusante do reservatório Gramame-Mamuaba, a vazão outorgável foi tomada como 90% da vazão regularizada pelo reservatório com 98% de garantia.

O confronto entre a vazão outorgável e a outorgada evidencia o atual esgotamento das vazões outorgáveis da bacia, as quais, na maioria dos trechos, já possuem outorgas liberadas muito superiores à recomendada pela legislação vigente. Por este motivo, nesta aplicação, nos trechos onde sabidamente as demandas outorgadas atuais são superiores à outorgável, este excesso foi convertido em vazão adicional requerida, sendo distribuída a usuários característicos do trecho.

As vazões médias históricas foram obtidas do plano diretor da bacia (PARAÍBA, 2000), bem como as vazões mínimas mensais, as quais foram utilizadas para determinação da vazão ecológica em cada ponto de referência, adotada como o maior valor entre a vazão mínima e a vazão referente a 10% da vazão de referência. A Tabela 1 apresenta os valores obtidos para a vazão ecológica, bem como a vazão outorgável e a vazão outorgada, limitada à outorgável.

A série histórica de precipitação média mensal foi obtida utilizando o método dos Polígonos de Thiessen aplicado em 9 postos pluviométricos localizados na bacia e em sua vizinhança. As séries históricas de precipitação dos postos utilizados foram obtidas do plano diretor da bacia, sendo considerado o período de 1972 a 1987.

Como participantes do processo de alocação foram considerados 28 usuários, divididos entre os dez pontos de referência. Destes, 24 são usuários de irrigação, com solicitação de um aporte adicional de vazão para os meses de setembro a março; 2 são usuários industriais de captação, com solicitação de aporte adicional de vazão para todos os meses dos anos; e 2 são usuários industriais de lançamento de efluentes (ambos no trecho 3), com solicitação de aporte adicional de vazão para diluição de seus despejos, para todos os meses do ano: 79 l/s (para o usuário com carga de 23.700 mg/s de DBO) e 750 l/s (para o usuário com carga de 150.000 mg/s de DBO).

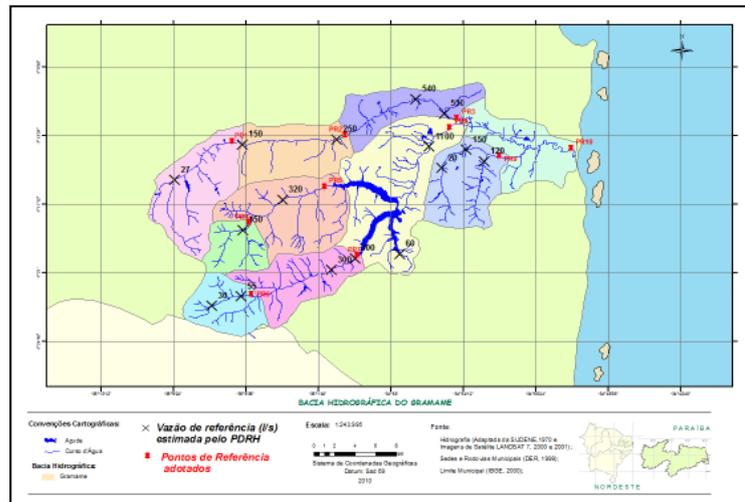


Figura 3 – Bacia Hidrográfica do rio Gramame e pontos de referência utilizados.

Tabela 1 – Vazões outorgável, outorgadas e ecológicas em cada ponto de referência.

Ponto de Referência	Vazão (l/s)		
	Outorgável	Outorgada	Ecológica
PR1	135,00	6,00	15,00
PR2	225,00	91,66	37,53
PR3	495,00	495,00	55,00
PR4	135,00	0,00	15,00
PR5	288,00	288,00	32,00
PR6	49,50	49,50	5,50
PR7	270,00	270,00	30,00
PR8	2.817,00	2.688,88	110,00
PR9	243,00	243,00	27,00
PR10	3.555,00	46,94	395,00

Módulo de determinação da vazão disponível

A análise do regime hidrológico, para determinação do volume disponível a ser alocado para determinado período em cada ponto de referência da bacia hidrográfica, requer a utilização de um modelo de balanço hídrico integrado, considerando os aportes resultantes da inter-relação entre a previsão hidrometeorológica para o período analisado, a interação rio-aquífero e a previsão de comportamento dos reservatórios. Este volume disponível previsto, no entanto, quando da sua distribuição, deve ser atualizado considerando as demandas de captação e de lançamento, bem como a vazão ecológica em cada ponto da bacia.

Nesta aplicação não são consideradas as incertezas e foi utilizado um modelo simplificado de previsão de vazão. Neste modelo simplificado utiliza-se como dado de entrada a informação das previsões probabilísticas de precipitação para o horizonte de planejamento, aqui assumido como de doze meses (classificadas em acima da média histórica, abaixo da média histórica e em torno da média histórica). Estas previsões são elaboradas, nos meses que antecedem o período chuvoso, através do chamado prognóstico climático de consenso (e.g., AESA, 2011), contudo, nesta aplicação não é feita a atualização da previsão ao longo do ano.

Com esta informação, aplicou-se um método de reamostragem estatística (Croley, 1996; Galvão, 1999), o qual utiliza previsões categorizadas probabilísticas de uma variável hidrometeorológica para inferir a probabilidade de ocorrência de outra variável derivada da primeira. Neste trabalho, utiliza-se a informação da previsão probabilística da precipitação para geração de uma série sintética, também de precipitação, com duração de 1000 anos. Esta série sintética é obtida repetindo-se os registros da série histórica de precipitação de tal modo que a série sintética obedeça às probabilidades de ocorrência estabelecidas na previsão. Assim, os registros pertencentes às categorias que tiveram maior probabilidade na previsão estarão presentes, na série sintética, em maior número que os registros pertencentes às categorias com menor probabilidade de ocorrência prevista (Galvão, 1999).

O valor previsto para a vazão excedente foi obtido da seguinte forma: toma-se a precipitação mensal prevista pela média aritmética da precipita-

ção do referido mês de todos os anos da série sintética originada; divide-se esta precipitação mensal prevista pela precipitação mensal média histórica originando um coeficiente de afluência; multiplica-se o coeficiente de afluência mensal pela vazão mensal média histórica em cada ponto de referência para estimativa da vazão mensal prevista.

Para determinação da vazão disponível são subtraídos ainda os usos outorgados já existentes e a vazão destinada à manutenção do ecossistema aquático, vazão ecológica.

Módulo de otimização multiobjetivo

Consiste no principal desafio deste módulo a definição das restrições e funções objetivo que melhor representem o problema, de acordo com os dados e modelos disponíveis.

Sabe-se que em bacias hidrográficas dotadas de grandes reservatórios de regularização plurianual, como é o caso deste estudo, o foco principal do órgão gestor é a operação do reservatório, de modo a cumprir a sua função de regularização da vazão e armazenamento da água para utilização nos períodos de estiagem. Desta forma, consideraram-se nesta aplicação duas restrições relacionadas à operação do reservatório, onde se concentram a maior parte das outorgas de captação, além de uma restrição relacionada ao lançamento de poluentes em cursos d'água, de modo a incluir no processo de alocação também as outorgas de diluição.

Estas restrições estão definidas a seguir, baseadas na operação atual e diretrizes do órgão gestor:

- **Sustentabilidade da operação no reservatório:** Definida através da comparação entre o nível final e o inicial do reservatório. Soluções cujo nível final do reservatório seja menor do que 90% do inicial são consideradas inviáveis.
- **Nível de reserva no reservatório:** Manutenção de um nível de reserva no reservatório para absorver as incertezas envolvidas e garantir os usos prioritários. Soluções que violem esse volume de reserva (adotado neste caso como 40% do volume útil) são consideradas inviáveis.
- **Concentração admissível dos poluentes:** Para usuários de lançamento de efluentes, a carga lançada deve ser diluída na vazão disponível presente no trecho, sem alteração da concentração admissível. Soluções que

violem a concentração admissível são consideradas inviáveis. Foi considerado neste estudo apenas a DBO.

Estas restrições foram utilizadas tanto nas adaptações apresentadas para o método de otimização quanto nos operadores de reprodução. A seguir estão apresentados os níveis de severidade e ações de reparo da mutação direcionada definidas para cada restrição.

- **Sustentabilidade da operação no reservatório:** “Severidade Baixa”. **Ação da mutação:** Diminui a vazão alocada aos usuários de trechos imediatamente a montante do reservatório, em todos os meses.
- **Nível de reserva no reservatório:** “Severidade Média”. **Ação da mutação:** Diminui a vazão alocada aos usuários de trechos imediatamente a montante do reservatório, a partir do mês imediatamente anterior ao ponto de falha.
- **Concentração admissível dos poluentes:** “Severidade Alta”. **Ação da mutação:** Diminui a vazão alocada dos usuários de lançamento de efluentes dos trechos onde ocorreu o alarme, a partir do mês do ponto de falha.

Alguns pesquisadores têm sugerido funções objetivo com o propósito de minimizar a diferença entre o valor requerido pelo usuário e o valor alocado (Bhaktikul *et al.*, 2007; Wang *et al.*, 2009a), considerar requisitos de eficiência econômica (Wang *et al.*, 2009a) e minimizar a emissão de poluentes (Wang *et al.*, 2009a). Neste trabalho foram definidas funções similares, com os mesmos propósitos, conforme descrição:

- **Função objetivo 1:** De ordem técnico-econômica, é uma função de maximização da satisfação do usuário, por tentar aproximar o volume alocado o tanto mais próximo quanto possível do requerido, ao mesmo tempo em que busca a maximização da eficiência econômica dos usuários da bacia (é diretamente proporcional ao lucro unitário) e a eficiência do uso da água (diretamente proporcional ao coeficiente de eficiência).

$$FO1_{MAX} = \frac{\sum_{c=1}^{nPC} \sum_{u=INI_c}^{uFIM_c} \left(\frac{\sum_{m=1}^{nm} \frac{Va_{u,m} \cdot L_u \cdot CEU_u}{Vr_{u,m}}}{nuc} \right)}{nPC} \quad (4)$$

Onde:

FO₁ é a função objetivo de ordem técnico-econômica;

nPC é o número de pontos de captação na bacia;

nuc é o número de usuários vinculados ao ponto de captação **c**;

uINI_c é o índice do usuário inicial do ponto de captação **c**;

uFIM_c é o índice do usuário final do ponto de captação **c**;

Va_{u,m} é o volume adicional alocado para o usuário **u** no mês **m** [m³];

Vr_{u,m} é o volume adicional requerido pelo usuário **u** no mês **m**, [m³];

nm é número de meses do período da análise;

L_u é o lucro unitário do usuário **u**, valor tomado normalizado em relação ao lucro máximo dentre todos os usuários, sendo, portanto, variável de 0 a 1 e adimensional;

CEU_u é o coeficiente de eficiência do uso da água pelo usuário **u**, valor variável de 0 a 1, onde 1 consiste no uso mais eficiente, sem perdas na utilização da água.

- **Função objetivo 2:** De ordem ambiental, busca a minimização da emissão de poluentes, através da maximização da aproximação da carga emitida com a carga meta definida para cada usuário de lançamento de efluentes.

$$FO2_{MAX} = \frac{\sum_{c=1}^{nPC} \sum_{u=INI_c}^{uFIM_c} \left(\frac{\sum_{m=1}^{nm} \frac{W_{u,m}}{Wm_{u,m}}}{nuc} \right)}{nPC} \quad (5)$$

Onde:

FO₂ é a função objetivo de ordem ambiental;

nPC é o número de pontos de captação na bacia;

W_{u,m} é a carga de DBO lançada pelo usuário **u**, no mês **m**, em função do seu volume alocado e da sua concentração [kg/mês];

Wm_{u,m} é a carga meta estipulada para o usuário **u**, no mês **m**, [kg/mês].

Módulo de balanço hídrico quali-quantitativo

Na propagação da vazão é considerado o balanço hídrico quantitativo integrado da bacia, ou seja, as alocações de água realizadas para usuários a montante contribuem diminuindo o volume disponível para os usuários de jusante e vice-versa. Na modelagem qualitativa, como os usuários de lançamento estão concentrados em um único trecho, não foi realizado o cálculo da propagação e autodepuração das cargas ao longo da bacia, sendo apenas analisado o trecho receptor do lançamento. Isso porque a informação da concentração resultante apenas é utilizada na verificação do atendimento à restrição de concentração admissível, não importando se esta restrição ocorre apenas no ponto de lançamento ou se persiste até o exutório da bacia.

Contudo, a dependência temporal das cargas lançadas foi considerada, ou seja, no primeiro intervalo de operação (primeiro mês) considerou-se uma carga inicial do trecho receptor resultante da concentração de 1,0 mg/l de DBO na totalidade da vazão disponível, mas, nos demais intervalos, o valor da concentração inicial foi tomado como a concentração resultante do mês anterior.

A concentração resultante no trecho receptor é obtida através da Equação 6, derivada do balanço de massas, para cada mês.

$$Cres_m = \frac{\sum_{u=1}^{nuL} (W_{u,m}) + W_{tr,m}}{Vdisp_{tr_m}} \quad (6)$$

Onde:

Cres_m é a concentração de DBO resultante no trecho receptor para o mês **m** [mg/l];

nuL é a quantidade de usuários de lançamento de efluentes;

W_{u,m} é a carga de DBO lançada pelo usuário **u**, no mês **m**, em função do seu volume alocado e da sua concentração [mg/mês];

W_{tr,m} é a carga inicial de DBO do trecho receptor no mês **m**, [mg/mês];

Vdisp_{tr_m} é o volume disponível para alocação no trecho receptor para o mês **m** [l/mês].

No reservatório, foi aplicado um modelo simplificado de operação, considerando como aporte as vazões remanescentes dos trechos a montante e a precipitação prevista e, como retiradas, a evaporação, a vazão outorgável do reservatório e o volume extravasado, quando ocorre. Ademais, considera-se ainda que uma vez que o alarme de nível do reservatório foi atingido, o volume liberado pelo reservatório

rio é reduzido pela metade, ou seja, os usuários já outorgados e/ou a vazão ecológica a jusante ficarão comprometidos.

Escolha da solução de alocação

Por se tratar de uma metodologia multiobjetivo que utiliza diretamente o conceito de otimalidade de Pareto, e devido aos objetivos serem conflitantes, ao final da otimização é provável que se encontre múltiplas soluções otimizadas. A obtenção de um conjunto de soluções diversas (todas não dominadas entre si) pode ser útil em uma possível negociação entre os usuários e o órgão gestor, atuando, neste caso, como um suporte à alocação negociada. Ou seja, as soluções não-dominadas da Fronteira de Pareto podem servir de cenários para decisões no âmbito de um comitê de bacia.

Contudo, é desejável que se indique uma única solução otimizada para o problema, desta forma, ao final da otimização a solução otimizada escolhida será aquela que possuir a melhor aptidão, considerando concomitantemente os critérios de viabilidade da solução e de dominância de Pareto. Ou seja, na prática serão priorizadas as soluções viáveis, e, dentre estas (ou na ausência destas), a que possuir o melhor valor de aptidão calculada segundo o método SPEA2.

Execução dos experimentos

Foram realizadas análises em dois cenários hipotéticos extremos acerca da previsão probabilística de precipitação: um cenário denominado Cenário de Escassez, no qual foi considerado um volume inicial do reservatório igual a 50% do volume útil e foram consideradas as seguintes probabilidades de precipitação: $P_s=0,8$; $P_n=0,1$; $P_{ch}=0,1$; e um cenário denominado Cenário de Excesso, com volume inicial do reservatório igual a 80% do volume útil e probabilidades de precipitação de $P_s=0,1$; $P_n=0,1$; $P_{ch}=0,8$. Onde P_s , P_n e P_{ch} é a probabilidade da precipitação no ano em análise ser equivalente a um ano seco, normal ou chuvoso, respectivamente.

Os demais dados de entrada, comuns para os dois cenários, foram: Concentração de DBO admissível: 10 mg/l (classe de enquadramento 3); Carga meta de DBO dos usuários do trecho 3: 50% da carga atual; Parâmetros do algoritmo evolucionário (População: 200; População externa: 100; Porcentagem de indivíduos reproduzidos por *Crossover* Média: 40%; Porcentagem de indivíduos reproduzidos por *Crossover* Média Direcionado: 40%; Porcentagem de indivíduos reproduzidos por Mutação

Direcionada: 20%; Probabilidade da Mutação Uniforme: 20%; Probabilidade da Mutação Direcionada: 50%; Probabilidade do *crossover*: 80%; Número de gerações: 1000).

Tabela 2 – Valores mensais de concentração de DBO e porcentagem do volume requerido atendido na Solução de Referência (SR) e na Solução Otimizada (SO) no Cenário de Escassez.

Mês	Concentração DBO (mg/l)		Volume atendido (%)	
	SR	SO	SR	SO
Jan	1,00	1,00	40,48	37,39
Fev	37,61	5,81	64,48	57,52
Mar	66,56	10,69	66,67	32,98
Abr	84,83	28,10	68,25	41,01
Mai	89,09	34,84	66,67	41,72
Jun	92,56	37,80	68,25	38,76
Jul	95,16	41,72	68,25	40,46
Ago	98,77	44,15	68,25	35,97
Set	100,89	48,22	87,83	74,76
Out	100,89	48,22	41,39	38,15
Nov	100,89	48,22	38,73	29,61
Dez	100,89	48,22	41,22	36,39
Média	80,76	33,08	60,04	42,06

Para análise da eficiência do algoritmo evolucionário, foi executada previamente uma enumeração semi-exaustiva dos dois cenários, contendo 10.000 soluções geradas aleatoriamente, além de soluções características, que alocam proporções determinadas do volume disponível equitativamente entre os usuários. Com a enumeração semi-exaustiva é possível ter uma idéia da forma e posição da fronteira Pareto em cada cenário, permitindo, então, uma análise da proximidade das soluções geradas pelo algoritmo evolucionário com esta fronteira.

Adicionalmente foi gerada uma Solução de Referência executando o módulo de determinação da vazão disponível e distribuindo-a aos usuários da seguinte forma: nos meses em que a vazão disponível em cada ponto de referência é superior à requerida, a vazão alocada é a requerida; nos meses em que a vazão disponível em cada trecho é inferior à requerida, a vazão alocada é definida através de imposição de uma redução percentual da vazão requerida na mesma proporção da redução necessária para que o montante alocado se torne igual ao disponível.

RESULTADOS

Cenário de Escassez

A Figura 4 apresenta os resultados da enumeração semi-exaustiva realizada para o Cenário de Escassez, com destaque para as soluções não-dominadas e para a Solução de Referência. Todas as soluções geradas são inviáveis, o que indica uma Fronteira de Pareto composta exclusivamente de soluções Não-Dominadas Inviáveis (soluções NDI). Em relação à Solução de Referência, foi detectado um ponto de falha igual a 2 (mês de fevereiro) relativo ao alarme de concentração admissível do efluente. Este alarme ocorre em todos os meses, com exceção do mês de janeiro, no qual a vazão prevista para o trecho 3 é inferior ao somatório da vazão já outorgada com a vazão ecológica, e, portanto, não há vazão disponível para alocação. Na Solução de Referência, também ocorrem alarmes de nível mínimo do reservatório nos meses de fevereiro, março e maio. Este alarme ocorre independentemente do volume alocado, pois, mesmo para a solução extrema de volume alocado igual a zero (o que resulta no valor máximo para a Função Objetivo 2, visto que nenhuma carga é lançada) os alarmes de nível continuam ocorrendo.

Ao executar a otimização com o algoritmo evolucionário, ao final das 1.000 gerações, 46 das 100 soluções da população são não-dominadas, e constituem-se, portanto, nas soluções otimizadas. Observa-se na Figura 5, que estas soluções, apesar de atingir a Fronteira de Pareto definida pela enumeração semi-exaustiva, estão situadas na sua faixa superior, caracterizadas por altos valores da Função Objetivo 2 e menores valores da Função Objetivo 1. Isso evidencia o processo de otimização imposto pelos operadores direcionados, pois, na busca por soluções viáveis, o algoritmo tenta progressivamente eliminar os alarmes. Logo, as soluções migram para a região de menores vazões alocadas, as quais fornecerão menores valores de concentrações lançadas nos rios e menos alarmes de nível mínimo no reservatório principal. O algoritmo não realiza alocação de cargas diretamente, mas aloca a vazão de diluição para usuários de lançamento; portanto, quanto menor a vazão alocada para este usuário menor será a carga admissível a ser lançada e menor será a concentração resultante no trecho que recebe o lançamento.

Ao verificar o comportamento da Solução Otimizada de melhor aptidão frente ao comportamento da Solução de Referência, ambas também destacadas na Figura 5, observa-se que, enquanto a

Solução de Referência (gerada utilizando apenas critérios de melhor aproveitamento do volume disponível e equidade na sua distribuição) apresentou alarme de concentração a partir do mês de fevereiro, a Solução Otimizada de melhor aptidão apresenta este alarme a partir do mês de março, e com valores mais próximos do admissível. Contudo, pode ser observado na Tabela 2 que esta redução da concentração da DBO no trecho 3, de 80,76 mg/l para 33,08 mg/l em média, acarreta, por outro lado, uma diminuição da porcentagem do volume atendido, de 60,04% para 42,06%, em média. Em relação aos valores das funções objetivo, na solução de melhor aptidão houve um aumento do valor da Função Objetivo 2 de 42,4% com um decréscimo de apenas 8,76% na Função Objetivo 1, em relação à Solução de Referência.

Tabela 3 – Valores mensais de concentração de DBO e porcentagem do volume requerido atendido na Solução de Referência (SR) e na Solução Otimizada (SO) para o Cenário de Excesso.

Mês	Concentração DBO (mg/l)		Volume atendido (%)	
	SR	SO	SR	SO
Jan	1,00	1,00	41,5	37,39
Fev	37,61	1,22	52,8	57,52
Mar	62,85	1,64	33,0	32,98
Abr	73,01	1,91	41,0	41,01
Mai	78,75	2,09	41,7	41,72
Jun	83,51	2,48	38,8	38,76
Jul	86,46	2,63	40,5	40,46
Ago	90,89	3,15	36,0	35,97
Set	95,64	3,39	72,0	74,76
Out	95,64	3,39	42,4	38,15
Nov	95,64	3,39	32,9	29,61
Dez	95,64	3,39	40,4	36,39
Média	74,72	2,47	42,7	42,06

Observa-se, portanto, que mesmo em um cenário de escassez, o algoritmo comportou-se conforme o esperado, na medida em que tentou se aproximar progressivamente da região que conduz a menos alarme, que seria aquela que aloca menores proporções da vazão disponível. Em uma situação real, o algoritmo não seria aplicado para um ano cuja previsão indicasse um cenário de escassez, pois, mesmo com disponibilidade excedente em alguns

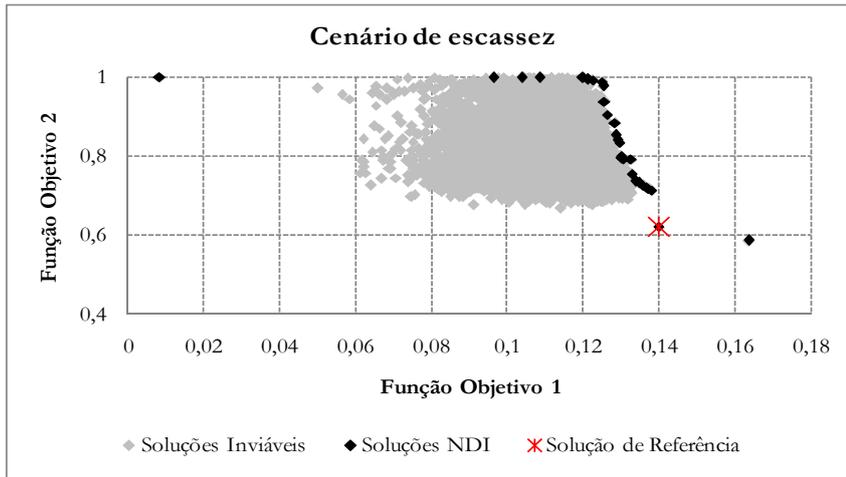


Figura 4 – Resultados da enumeração semi-exaustiva para o cenário de escassez.

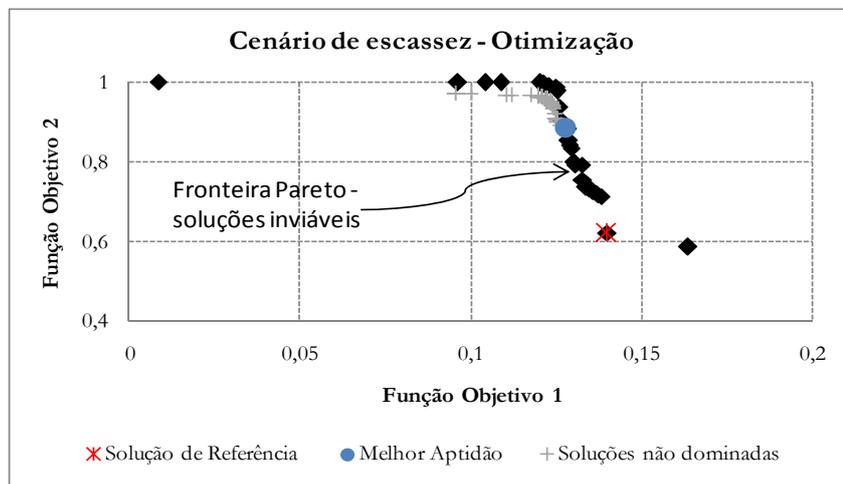


Figura 5 – Resultados da otimização para o cenário de escassez.

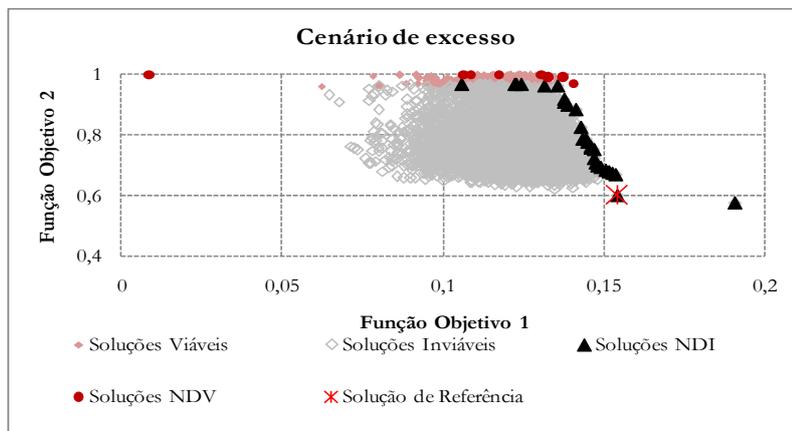


Figura 6 – Resultados da enumeração semi-exaustiva para o cenário de excesso.

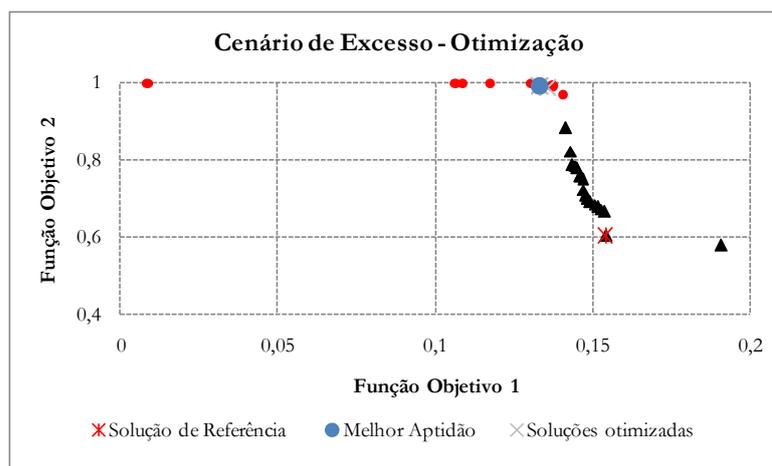


Figura 7 – Resultados da otimização para o cenário de excesso.

meses, ao longo do ano não seria viável alocar além da outorgada. Contudo, pode-se concluir destes resultados que, se não para distribuir o excedente em uma outorga adicional, em previsões de seca este algoritmo pode ser utilizado para redistribuir ou repactuar a vazão já outorgada entre os usuários da bacia, de modo a prevenir o esvaziamento dos reservatórios ou a poluição dos cursos d'água.

Cenário de Excesso

A Figura 6 apresenta os resultados da enumeração semi-exaustiva realizada para o Cenário de Excesso, com destaque para as soluções não-dominadas, separadas de acordo com a sua viabilidade, e para a Solução de Referência.

Ao executar a otimização com o algoritmo evolucionário, ao final das 1.000 gerações, todas as 100 soluções da população são viáveis, no entanto, apenas 13 são não-dominadas e constituem-se, portanto, nas soluções otimizadas.

Observa-se na Figura 7 que, apesar da Fronteira de Pareto ser composta por soluções viáveis e inviáveis, as soluções otimizadas estão localizadas apenas na região viável desta fronteira. Isto é uma consequência da adaptação inserida no método de otimização multiobjetivo, pois, caso o conceito de viabilidade não estivesse inserido no mesmo, dificilmente as soluções viáveis seriam encontradas, por estar em uma faixa limitada da fronteira. Em outros cenários, pode ser que até mesmo as soluções inviáveis dominem as viáveis, o que impossibilitaria a progressão para a região de viabilidade sem estas

adaptações inseridas, ou seja, considerando apenas os critérios de dominância de Pareto.

Analisando pontualmente a Solução de Referência e a Solução Otimizada de melhor aptidão, observa-se que, enquanto a primeira apresenta alarme de concentração a partir do mês de fevereiro e três alarmes de nível, a segunda não apresenta qualquer alarme. Da Tabela 3, é possível verificar que, além de ser viável e reduzir a concentração média do trecho 3 de 74,72 mg/l para 2,47 mg/l, a porcentagem média do volume atendido não foi significativamente reduzida, passando de 42,7% para 42,06%. Nesta tabela ainda é possível distinguir a qualidade das soluções viáveis (representada pela Solução Otimizada) frente às inviáveis (representada pela Solução de Referência).

Neste cenário, é evidente a percepção de que o algoritmo buscou redistribuir a vazão disponível entre usuários e meses de modo a não provocar alarmes, mas sempre na tentativa de maximizar os propósitos da Função Objetivo 1 (atender o máximo da vazão requerida) e da Função Objetivo 2 (atender a meta estipulada para a carga de poluentes lançada).

CONCLUSÕES

Na busca de uma gestão hídrica cada vez mais eficiente reforça-se, neste trabalho, a necessidade de alocar para os diferentes usos o excesso de água que se torna disponível em períodos de vazão superior à outorgável, permitindo uma ampliação

da produção de riquezas sociais. Observou-se ainda que, apesar deste volume excedente ocorrer com frequência, devido aos atuais critérios de outorga adotados, é possível que ocorra também cenários extremos de seca, nos quais a vazão disponível se torne insuficiente para atender até mesmo os usos já outorgados.

Apontou-se como solução o desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão que ao mesmo tempo seja capaz de prever e alocar este volume excedente, com equidade, segurança e atendendo a múltiplos objetivos, bem como definir os níveis de racionamento em períodos de seca, adaptando-se, portanto, à variabilidade climática. Para o desenvolvimento deste sistema é necessário envolvimento e a integração de inúmeras variáveis e modelos, os quais devem ser estruturados e acoplados em um modelo de otimização apropriado. Para o modelo de otimização, foi proposta neste trabalho a utilização de um algoritmo evolucionário multiobjetivo com operadores especiais (desenvolvidos de forma a incorporar tais requisitos e restrições) que tem como objetivo a obtenção de soluções factíveis e consistentes com os instrumentos de gestão dos recursos hídricos.

Os resultados obtidos apresentam boas perspectivas de sucesso da metodologia apresentada, uma vez que, em ambos cenários, o algoritmo progrediu para a Fronteira de Pareto, buscando nesta fronteira as regiões de viabilidade, quando existia, ou de menores ocorrências de alarmes. Contudo, foi observada, em alguns meses, uma insuficiência da vazão prevista para atender os usos já outorgados e a vazão ecológica, mesmo no Cenário de Excesso. Nestes meses, o algoritmo ignora a necessidade do racionamento e segue para o mês seguinte alocando a disponibilidade prevista deste mês sem considerar que no anterior algum usuário legalmente habilitado, ou a vazão ecológica, ficaram comprometidos.

Para aperfeiçoamento do algoritmo, pode ser nele considerada a possibilidade de alocação do racionamento nos meses críticos entre os usuários legalmente outorgados e alguma forma de compensação para estes usuários nos meses em que houver disponibilidade excedente, com prioridade sobre a alocação adicional.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa teve suporte do CT-HIDRO/FINEP, CNPq, CAPES e AESA-PB.

REFERÊNCIAS

- AESA (2011). *Relatório da VII reunião de análise e previsão climática para o setor leste do Nordeste do Brasil – ano 2011*. João Pessoa, AESA.
- BECERRA, R; COELLO, C. (2005). *Use of domain information to improve the performance of an evolutionary algorithm*. Genetic And Evolutionary Computation, Proceedings of the 2005 workshops on Genetic and evolutionary computation. Washington.
- BHAKTIKUL, K.; SOIPRASERT, N; SOMBUNYING, W. (2007). *Comparison of Genetic Algorithm and WASAM model for real time water allocation: A case study of Song Phi Nong Irrigation Project*. 4th INWEPF Steering Meeting and Symposium
- BRASILEIRO, E. (2005). *Um algoritmo genético para otimização do controle em tempo real de redes de escoamento de petróleo*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- COELLO, C. (2006). *Evolutionary multi-objective optimization: a historical view of the field*. IEEE Computational Intelligence Magazine, vol. 1, n. 1, p. 28 – 36.
- CROLEY, T. E. (1996). *Using NOAA's new climate outlooks in operational hydrology*. Journal of Hydrologic Engineering, New York, v.1, n.3, p.93-102.
- DANDY, G.; SIMPSON, A.; MURPHY, L. (1996). *An improved genetic algorithm for pipe network optimization*. Water Resources Research, Vol. 32, NO. 2, p. 449-4583.
- DAVIS, L. (1991). *Handbook of genetic algorithms*. Van Nostrand Reinhold.
- GALVÃO, C. O. (1999). *Aplicabilidade em recursos hídricos da previsão de precipitação de longo prazo no Nordeste do Brasil*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre – RS.
- LACERDA, E.; CARVALHO, A. (1999). *Introdução aos algoritmos genéticos*. In: GALVÃO, C.; VALENÇA, M. (organizadores), *Sistemas inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais*. ABRH, editora UFRGS, Porto Alegre, p. 99 – 150.
- LANNA, A. E.; PEREIRA, J. S., SILVA, L. M. (1997). *Análise de critérios de outorga de direitos de uso da água*. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo – SP.
- LIMA, G.; BOLDRIN, R. S.; CASTRO, M. A. S.; SOUZA, M. P.; MAUAD, F. F. (2005). *Critérios técnicos para outorga de direito de uso de recursos hídricos*. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa – PB.

- MACHADO, E. (2006). *Operação de redes de escoamento de petróleo utilizando algoritmo genético multi-objetivo*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.
- MONTESINOS, P.; GARCIA-GUZMAN, A; AYUSO, J. (1999). *Water distribution network optimization using a modified genetic algorithm*. Water Resources Research, Vol. 35, NO. 11, p. 3467-3473.
- OHLSSON, L. (1999). *Environment, Scarcity and Conflict – A study of Malthusian concerns*. PhD Thesis. Dept. of Peace and Development Research, University of Goteborg.
- PARAÍBA (2000). *Plano diretor de recursos hídricos da Bacia do rio Gramame*. Governo do Estado da Paraíba, Secretaria Extraordinária do Meio Ambiente, dos Recursos Hídricos e Minerais – SEMARH.
- SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. (2004). *Outorga de direito de uso de recursos hídricos: Uma das possíveis abordagens*. In: Machado, C. J. S. (Org.) - Gestão de Águas Doces. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, v. 1, p. 135-178.
- STUDART, T. M. C.; CAMPOS, J. N. B. (2001). *Incertezas nas estimativas da vazão regularizada por um reservatório*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 6, n. 3, 81 – 94.
- VENKATRAMAN, S.; YEN, G. (2005). *A Generic Framework for Constrained Optimization Using Genetic Algorithms*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 9, NO.4.
- VIEIRA, Z. M. DE C. L.; RIBEIRO, M. M. R. (2010). *A methodology for first- and second-order water conflict resolution*. Water policy, v. 12, p. 851-870.
- WANG, X.; SUN, Y.; SONG, L.; MEI, C. (2009a). *An eco-environmental water demand based model for optimizing water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms. Part I. Model development*. Journal of Environmental Management 90:2628–2635.
- WANG, X.; SUN, Y.; SONG, L.; MEI, C. (2009b). *An eco-environmental water demand based model for optimizing water resources using hybrid genetic simulated annealing algorithms. Part II. Model application and results*. Journal of Environmental Management 90:2612–2619.
- YANG, Z.; CUI, B.; CHEN HE. (2007). *A holistic approach for evaluating ecological water allocation in the Yellow River Basin of China*. Front. Environ. Sci. Engin. China, 1(1): 99–106.
- ZHANG, W.; WANG, Y.; PENG, H.; LI, YITING; TANG, JUSHAN; WU, K. B. (2010a). *A coupled water quantity-quality model for water allocation analysis*. Water

Resources Management, volume 24, número 3, 485-511.

ZHANG, W.; WEI, C.; ZHOU, J. (2010b). *Optimal Allocation of Rainfall in the Sichuan Basin, Southwest China*. Water Resources Management, volume 24, número 5, 4529-4549.

ZITZLER, E.; LAUMANNNS, M.; THIELE, L. (2001). *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. Technical report 103, Zürich, Switzerland: Computer Engineering and Network Laboratory (TIK), Swiss Federal Institute of Technology (ETH).

Qualitative and Quantitative Water Allocation in River Basins: Multiobjective Methodology as Part of the Context of Water Resources Management

ABSTRACT

In Brazil, water rights grant criteria are very restrictive, causing discontent among users and generating conflicts, mainly in several water basins, where the total water demands exceed the maximum legal volume. The traditional water allocation, based only on quantitative criteria, is no longer enough. It is necessary to consider multiple and conflictive objectives, the stochastic behavior of hydrologic data, and associated uncertainties, which makes the water allocation models increasingly complex. This paper presents an allocation methodology of surplus water availability in a watershed, considering multiple objectives and constraints, multiple users and also easy adaptability to use with other models and rationing scenarios (zero or negative surplus discharge). Thus a methodology is proposed for optimizing the allocation of surplus discharge in a basin through a multiobjective evolutionary algorithm in which adaptations and reproduction operators were inserted to incorporate the specific constraints of the problem and overcome the obstacles presented. The methodology was evaluated in the Gramame river basin and the analysis included two hypothetical scenarios of probabilistic forecasts of precipitation: one above-normal forecast and one below-normal forecast. The results show that the algorithm proved to be adequate, because there was convergence for the most feasible regions of Pareto Front.

Key-words: Water Allocation. Grant Criteria. Evolutionary Algorithms.