

Modelagem Hidrológica de Uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraí-RS

Bruno Collischonn

Agência Nacional de Águas
bruno.collischonn@ana.gov.br

Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn, Fernando Setembrino Cruz Meirelles
Edith Beatriz Camano Schettini, Fernando Mainardi Fan

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Recebido: 14/06/10 - revisado: 04/10/10 - aceito: 14/08/11

RESUMO

Bacias hidrográficas com usos muito intensos de água e com a presença de muitos reservatórios pequenos, sobre os quais não se dispõem de informações completas, são bastante comuns no Brasil. As séries hidrológicas em postos fluviométricos nestas bacias normalmente estão bastante afetadas pelas atividades humanas. Um modelo hidrológico pode permitir analisar mais detalhadamente bacias com estas características, procurando identificar os impactos da irrigação e da regularização sobre a disponibilidade de água. Este artigo apresenta uma aplicação do modelo MGB-IPH à bacia do rio Quaraí, situado na região de fronteira entre o Brasil e o Uruguai. Para esta aplicação foram realizadas três modificações importantes no modelo: discretização da bacia em pequenas sub-bacias em lugar da tradicional discretização em células quadradas; simulação de um grande número de pequenos reservatórios; e simulação explícita e individual de lavouras de arroz irrigadas. O modelo hidrológico foi calibrado considerando a influência de retiradas de água para irrigação e da presença de reservatórios. Posteriormente o modelo foi aplicado considerando um cenário natural – sem a presença dos açudes e das retiradas de água – e outros cenários, procurando isolar as influências dos reservatórios e das retiradas de água. Os resultados mostram que a demanda de água supera a disponibilidade na bacia, e que as retiradas de água diretamente dos rios tem um impacto maior do que a retirada de água dos açudes na disponibilidade hídrica de forma geral.

Palavras-chave: irrigação, reservatórios, modelo hidrológico, bacia do rio Quaraí

INTRODUÇÃO

Uma situação frequentemente encontrada na gestão de recursos hídricos é a comparação entre disponibilidade e demanda de água em uma bacia hidrográfica. A demanda é calculada de acordo com os usos atuais e futuros da água. A disponibilidade é a oferta de água proporcionada pela bacia, que depende de suas características naturais e do clima da região, e pode ser alterada pela criação de reservatórios ou pela transposição de água de bacias vizinhas.

Modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são ferramentas úteis na análise da disponibilidade de água em bacias hidrográficas. Uma dificuldade importante na aplicação deste tipo de modelos é a necessidade de definir valores de parâmetros do modelo com base em séries observadas de chuva e de vazão. Este processo é denominado de calibração do modelo hidrológico, e pode ser realizado utili-

zando procedimento manual ou automático (Tucci, 2005).

Em bacias com usos intensos da água, como significativas retiradas de vazão diretamente dos rios ou grandes alterações do regime hidrológico devidas à presença de reservatórios, as séries de dados de vazão utilizadas na calibração dos modelos hidrológicos e na avaliação da disponibilidade hídrica podem estar influenciadas pelas atividades humanas (Silans et al., 2000; Cruz e Silveira, 2007).

Em geral, os modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão são calibrados desconsiderando os usos da água ou tentando evitar a influência das retiradas da água e dos reservatórios, através da escolha de períodos de dados mais antigos, em que a influência pode ser considerada menor. Porém, quando os usos da água ou a influência dos reservatórios não podem ser desprezados, as séries devem ser naturalizadas. Isto significa que a influência das retiradas de água e da operação dos reservatórios deve ser elimi-

nada através de correções nos dados (Collischonn et al., 2007a).

Quando os dados sobre os reservatórios são desconhecidos, a renaturalização das séries de vazão torna-se extremamente complexa. Bacias com um grande número de reservatórios pequenos, sobre os quais se desconhecem as características fundamentais, como o volume, são bastante comuns no Brasil (Campos et al., 2000). Um estudo recente, baseado em imagens de satélite CBERS, permitiu identificar mais de 4000 reservatórios com área inundada superior a 20 ha somente na região Nordeste (Martins et al., 2007).

Bacias em que o uso intensivo de água para irrigação é tão longo quanto as próprias séries hidrológicas também são muito comuns. Na região Sul do Brasil, a atividade agrícola que apresenta o maior consumo de água é a cultura de arroz irrigado. Esta cultura, presente na região desde o início do século XX, apresenta uma demanda muito grande de água que, em geral, não pode ser suprida apenas pela vazão dos rios durante os meses de primavera-verão, que é a época da atividade. Atualmente, a área irrigada com arroz no Rio Grande do Sul oscila em torno de um milhão de hectares. Ao longo dos últimos 100 anos foram construídos milhares de pequenos reservatórios para garantir o suprimento de água para irrigação. Estes reservatórios, que recebem o nome local de açudes, foram construídos, muitas vezes, pelos próprios proprietários das terras, e estão localizados, em geral, inteiramente no interior de suas propriedades.

Um grande número de açudes, ainda que pequenos, podem causar um impacto hidrológico significativo (Campos et al., 2000). Existem diversas tentativas de levar em conta estes reservatórios em modelos hidrológicos chuva-vazão (Silans et al., 2000; Güntner et al., 2004; Payan et al., 2008). Um problema frequentemente enfrentado quando os reservatórios são incluídos nos modelos hidrológicos é que não existem informações detalhadas sobre as relações cota-área-volume, nem sobre as estruturas hidráulicas de saída d'água dos reservatórios. Uma alternativa possível é a utilização de uma relação estatística entre área superficial máxima e volume, uma vez que a área superficial pode ser estimada, com razoável precisão, a partir de imagens de satélite. Um exemplo é apresentado por Sawunyama et al. (2006), que usaram uma relação estatística entre área superficial e volume para estimar capacidade de armazenamento de aproximadamente 1000 reservatórios no Zimbábue (África).

Neste trabalho apresenta-se uma aplicação de um modelo hidrológico chuva-vazão em uma

bacia com intensivo uso de água para irrigação, e com presença de centenas de pequenos reservatórios. O modelo aplicado é o MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001), incluindo as seguintes adaptações para esta aplicação:

- A bacia foi dividida em mini-bacias, em lugar das células quadradas normalmente utilizadas.
- Todos os reservatórios com mais de três hectares de área superficial máxima foram incluídos individualmente na simulação.
- As lavouras de arroz com mais de 10 hectares foram incluídas explicitamente e individualmente no modelo.
- As demandas de água para estas lavouras foram incluídas explicitamente no modelo.

O modelo hidrológico foi calibrado com base em dados fluviométricos de um período em que já existia grande uso de água para irrigação e em que a maioria dos açudes já estava presente. Posteriormente o modelo foi aplicado em cenários representando a situação natural, sem retiradas de água e sem a presença de açudes; a situação atual, com retiradas e com açudes; e outras situações.

Um aspecto importante do trabalho é que a demanda de água para irrigação do arroz foi calculada com base em estimativas de balanço hídrico das lavouras, com intervalo de tempo diário. Como a água da chuva foi considerada no balanço, a demanda de irrigação foi variável, de acordo com a pluviosidade de cada ano, representando de modo mais fidedigno o manejo da irrigação.

ÁREA DE ESTUDO

A bacia do rio Quaraí possui cerca de 14.800 km² e localiza-se na fronteira entre o sul do Brasil e a região nordeste do Uruguai (entre 57°36'W 31°05'S e 55°38'W 29°51'S). O rio Quaraí é tributário do rio Uruguai e faz parte da bacia do rio da Prata. A bacia caracteriza-se por possuir solos rasos e pela predominância de vegetação rasteira de campos. A figura 1 apresenta a bacia do rio Quaraí, as principais cidades e o relevo.

A bacia do rio Quaraí não tem uma sazonalidade hidrológica bem definida, com precipitações relativamente bem distribuídas ao longo do ano. Em geral, os meses de verão (dezembro a fevereiro), que coincidem com o período de cultivo do arroz,

tendem a ser um pouco mais secos, porém mesmo nestes meses podem ocorrer precipitações médias elevadas.

Atualmente, os problemas relacionados a recursos hídricos da bacia são as freqüentes inundações, principalmente nas áreas urbanas ribeirinhas ao rio Quaraí, contaminação das águas por lançamento de esgoto doméstico e conflitos pelo uso da água. A escassez hídrica ocorre porque a vazão de base é muito baixa e porque a demanda d'água para irrigação de lavouras de arroz é muito alta. A figura 2 mostra a bacia do Quaraí e a localização das diversas lavouras de arroz e pequenos açudes que são utilizados para armazenar água para irrigação (Schetti et al., 2007).

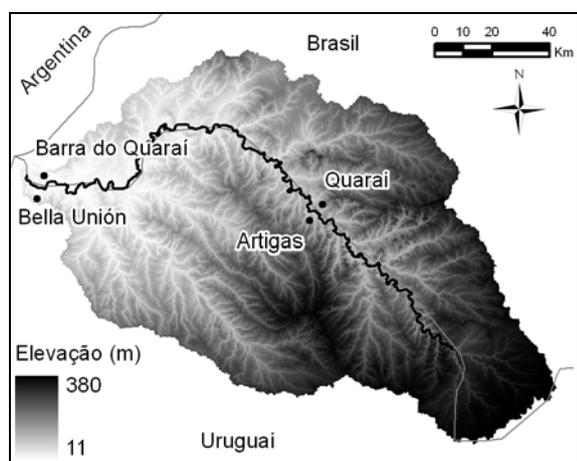


Figura 1 - Bacia do rio Quaraí compartilhada entre Brasil e Uruguai, principais cidades e relevo.

Na região ilustrada na figura 1, a fronteira entre o Brasil e o Uruguai é definida pelo curso do próprio rio Quaraí. Observa-se pela figura 2 que a presença de lavouras de arroz é mais concentrada na parte norte da bacia, que corresponde ao Brasil, e que estas lavouras também estão localizadas predominantemente a jusante das cidades de Quaraí e Artigas.

METODOLOGIA

Para apoiar a análise da hidrologia da bacia do rio Quaraí, foi desenvolvido um modelo hidrológico distribuído, baseado no modelo MGB-IPH (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007b).

O modelo MGB-IPH foi modificado para utilizar uma discretização da bacia em pequenas sub-bacias em lugar da tradicional discretização em células quadradas, de forma semelhante à utilizada por Collischonn et al. (2007a) em uma aplicação anterior no rio Caí (RS). Adicionalmente, o modelo foi adaptado para permitir a inclusão de um grande número de pequenos reservatórios presentes nesta bacia, situação comum em bacias do sul do Brasil nas quais existe o cultivo de arroz irrigado. Finalmente, o modelo foi modificado para representar de forma explícita e individual todas as lavouras de arroz irrigadas com mais de 10 hectares identificadas por imagens de satélite.

O modelo foi aplicado considerando cenários, de forma a permitir avaliar os efeitos individuais da presença dos reservatórios, da retirada de vazão dos rios, e da existência ou não de vazão de retorno.

Na sequência, são descritas brevemente a versão do modelo MGB-IPH utilizada e a forma adotada para representar os reservatórios (açudes) e lavouras de arroz no modelo.

O MODELO MGB-IPH

O modelo MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído desenvolvido para grandes bacias e está descrito detalhadamente em publicações anteriores (Collischonn e Tucci, 2001; Collischonn et al., 2007b).

O modelo é composto dos seguintes módulos: balanço de água no solo; evapotranspiração; escoamentos superficial, sub-superficial e subterrâneo na célula; e escoamento na rede de drenagem.

O balanço de água no solo é realizado utilizando uma metodologia baseada na geração de escoamento superficial por excesso de capacidade de armazenamento, porém com uma relação probabilística entre a umidade do solo e a fração de área de solo saturada. Já a propagação pela rede de drenagem é modelada através do método de Muskingun-Cunge.

O modelo possui um algoritmo de otimização multiobjetivo, no qual se busca maximizar os seguintes coeficientes de eficiência ou funções-objetivo: Coeficiente de Nash-Sutcliffe, coeficiente de Nash do logaritmo das vazões e erro de volume.

Na versão atual do MGB-IPH, a bacia hidrográfica é dividida em unidades menores denominadas mini-bacias, obtidas a partir do modelo digital de elevação (MDE), como descrito a seguir.

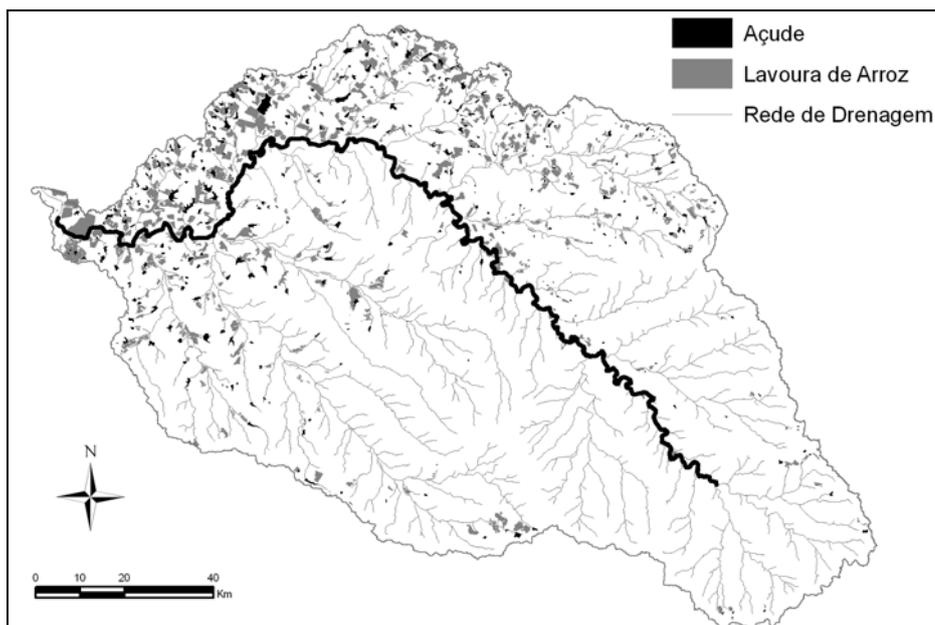


Figura 2 - Bacia do rio Quaraí com localização das lavouras de arroz irrigado e dos açudes.

Discretização da bacia

Em geral, em simulações com o modelo MGB-IPH, a bacia hidrográfica é subdividida em células quadradas de várias dezenas de km². Esta discretização em células quadradas tem algumas desvantagens importantes:

1. exige a utilização de métodos complexos para extrair informações de topologia (ligação entre as células) (Paz et al., 2006);
2. as ligações entre células geram uma rede de drenagem fictícia, que guarda pouca semelhança com a rede de drenagem real;
3. exige a utilização de métodos complexos para obter características físicas dos trechos de rios (Paz e Collischonn, 2007);
4. as áreas de drenagem não são muito bem representadas, especialmente no caso das pequenas bacias de cabeceira.

Em função destas dificuldades, optou-se pela discretização da bacia em pequenas bacias menores, aqui denominadas minibacias. Para isto, adotou-se, tanto quanto possível, o método de discretização utilizado no conjunto de ferramentas Arc-Hydro ou Hydro Tools (Maidment, 2002).

O ArcHydro pode ser entendido tanto como um conjunto de ferramentas, quanto como uma estrutura de dados projetada para armazenar e rela-

cionar entre si conjuntos de dados geográficos utilizados na área de recursos hídricos. A estrutura de dados ArcHydro é definida utilizando classes de objetos, em que os objetos de uma dada classe possuem propriedades ou atributos em comum, e objetos de classes diferentes podem ser relacionados através de atributos em comum (Maidment, 2002).

A estrutura de dados ArcHydro é utilizada para automatizar os processos de extração de informação e preparação de dados para modelagem em diversos modelos hidrológicos, como os modelos desenvolvidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (HEC, 2001; HEC, 2003) e pelo modelo SWAT (Olivera et al., 2006).

Uma seqüência típica de utilização das ferramentas ArcHydro inicia com um Modelo Digital de Elevação (MDE), a partir do qual são obtidas informações como direções de escoamento, área de drenagem, rede de drenagem, definição de trechos de rios e definição de bacias hidrográficas. No caso específico da aplicação do MGB-IPH, foi utilizado o MDE do Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), um levantamento topográfico realizado por radar com resolução espacial de 90m (Rabus et al., 2003; Sun et al., 2003), conforme apresentado na figura 1. A bacia do rio Quaraí foi discretizada em mini-bacias, denominadas “catchments” no jargão utilizado no conjunto de ferramentas do Arc-Hydro. Procurou-se definir como exutórios destas minibacias as principais confluências de cursos de água e

os reservatórios com mais de 3 ha de área inundada. Como resultado, a bacia do rio Quaraí foi dividida em 1156 mini-bacias, com área de drenagem sempre inferior a 100 km² (figura 3).

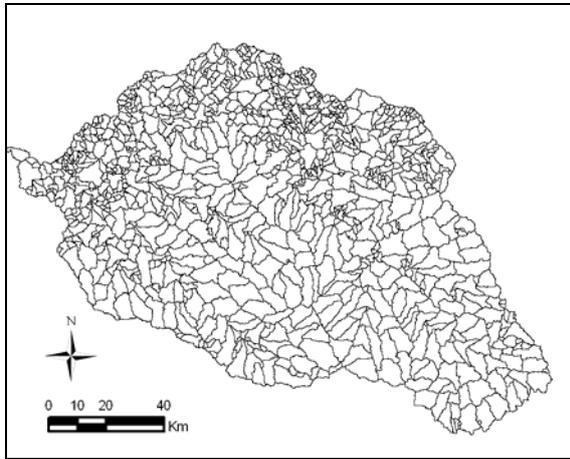


Figura 3 - Discretização da bacia do rio Quaraí em mini-bacias.

Simulação de balanço hídrico nos reservatórios

No modelo de simulação hidrológica, optou-se por uma representação individualizada de cada um dos reservatórios da bacia. Para isso foram identificados todos os reservatórios no interior da bacia com área inundada máxima no período anterior à irrigação superior a 3 hectares a partir de imagens de satélite. A imagem utilizada na identificação da área inundada foi do período de inverno, de forma a garantir que os reservatórios estivessem próximos da capacidade máxima de armazenamento. Considerou-se que os reservatórios com área inundada máxima inferior a 3 ha não têm influência significativa no ciclo hidrológico da bacia. Foram identificados 402 reservatórios na bacia, com áreas inundadas entre 3 e 1000 ha, aproximadamente. A mediana das áreas inundadas é de 23,6 ha, mostrando que a grande maioria dos reservatórios inunda áreas relativamente pequenas.

Para cada reservatório foi calculada a área da bacia de drenagem, com base no modelo digital de elevação do SRTM (Rabus et al., 2003; Sun et al., 2003), e em técnicas automáticas de extração de direções de fluxo e rede de drenagem encontradas em sistemas de informação geográfica.

As bacias de drenagem a estes reservatórios têm áreas entre 100 ha e 100 km², com área mediana de 3,6 km². A figura 4 apresenta a relação entre

área de drenagem e área inundada dos reservatórios identificados nas imagens de satélite.

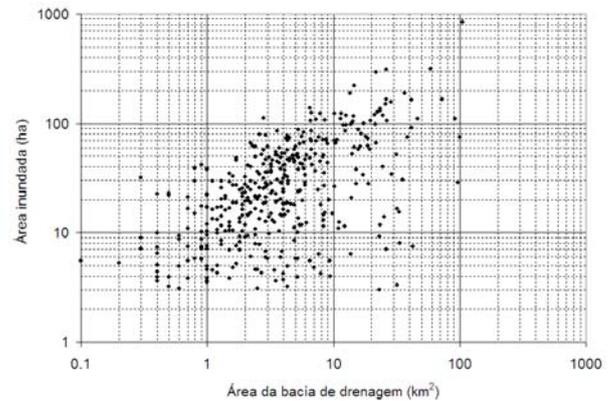


Figura 4 - Relação entre área da bacia de drenagem e área inundada dos 402 açudes identificados a partir de imagens de satélite, na bacia do rio Quaraí.

Na figura 5, os açudes existentes foram ordenados de acordo com área de drenagem, e a área inundada foi acumulada, de forma a demonstrar cumulativamente o porte das áreas de drenagem barradas. O total da área inundada pelos açudes na bacia do rio Quaraí supera 16 mil hectares, como pode ser visto na figura 5. Neste gráfico é possível observar ainda que a maior parte dos açudes da bacia está localizada em bacias com áreas de drenagem relativamente pequenas. Por exemplo, os açudes cujas bacias drenam menos do que 20 km² têm uma área inundada total de 12 mil hectares.

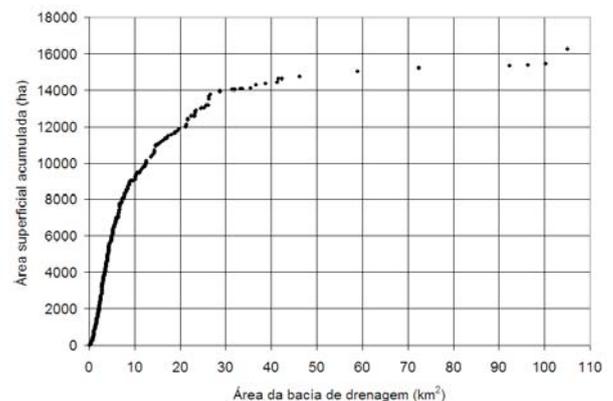


Figura 5 - Relação entre área da bacia de drenagem e área inundada acumulada dos açudes identificados a partir de imagens de satélite na bacia do rio Quaraí.

Embora seja relativamente fácil identificar os reservatórios nas imagens de satélite, e seja possível calcular a sua área inundada, praticamente não existem dados das características mais importantes do reservatório sob o ponto de vista da hidrologia: os volumes ou as relações cota-área-volume. Para apenas 108 dos 402 reservatórios identificados foi possível obter informações sobre o volume máximo. Grande parte dos reservatórios com este tipo de informação foi encontrada na porção uruguaia da bacia, através de um trabalho de cooperação com a Dirección Nacional de Hidrografía (DNH) do Uruguai (Schettini et al., 2007).

Para contornar a ausência de informação sobre os volumes dos reservatórios, foi criada uma equação de regressão linear entre os dados de área e de volume máximo dos 108 reservatórios com informações disponíveis. A figura 6 apresenta a relação entre área superficial e volume máximo do açude (pontos) e a equação de regressão linear ajustada (linha). Observa-se que há uma grande dispersão dos pontos, especialmente no caso dos maiores reservatórios.

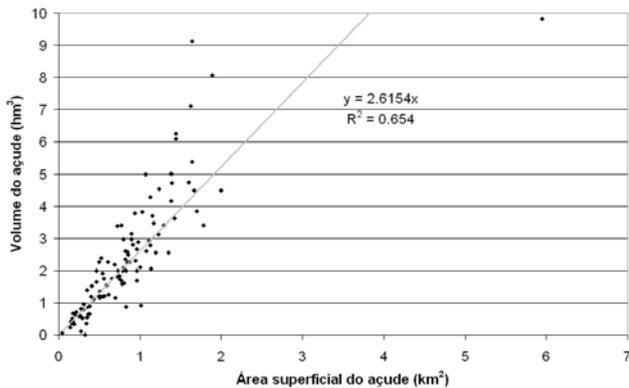


Figura 6 - Ajuste linear entre volume e área superficial de açudes cadastrados junto ao DRH-RS e à DNH.

Foi adotado o ajuste linear pelo fato de este modelo apresentar o melhor coeficiente de regressão, considerando que a regressão deveria passar pela origem para evitar volumes negativos ou espúrios. Para se ter uma idéia da variação abrangida pelo ajuste, cabe ressaltar que a adoção desta regressão para estimativa de volumes armazenados representou uma extrapolação de até 42% acima do maior volume cadastrado, e de 17% abaixo do menor volume cadastrado.

No modelo hidrológico cada um dos 402 açudes foi simulado de forma individual. Os açudes foram representados por uma equação de balanço

hídrico considerando entrada de água da chuva e da vazão afluyente e saída de água da retirada para irrigação, vertimento e evaporação. Não foram incluídos descarregadores de fundo, ou outro tipo de estrutura que permita manter vazões a jusante diferentes da retirada para irrigação quando o açude não estiver vertendo, porque são raramente utilizadas na região.

A figura 7 abaixo apresenta os detalhes do balanço hídrico de um açude, em que as entradas de água são a vazão afluyente (Q_i) e a precipitação direta (P), e as saídas de água são devidas à evaporação (E), ao vertimento (Q_v) e às demandas para irrigação (Q_d).

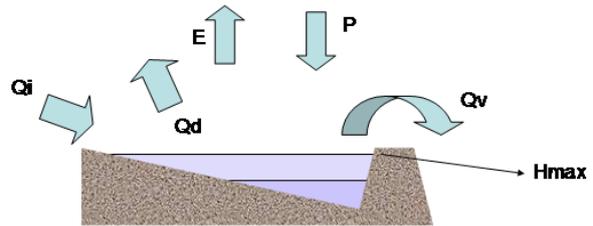


Figura 7 - Esquema de variáveis que atuam no balanço hídrico de um açude.

Para cada intervalo de tempo, a equação de balanço hídrico é aplicada obtendo o volume ao final do intervalo de tempo (VR_2), a partir do volume inicial (VR_1) e dos fluxos de entrada e saída durante o intervalo de tempo. Uma primeira estimativa para o volume final (VR_2') é obtida pela equação que segue:

$$VR_2' = VR_1 + A (P - E) + Q_i \cdot \Delta t \quad (1)$$

onde VR_2 , VR_1 , VR_2' , são volumes em m^3 ; A é a área superficial em m^2 ; P é a altura precipitada sobre o reservatório em um dia em m ; E é a altura de evaporação ao longo de um dia em m ; Q_i é a vazão de entrada em $m^3 \cdot s^{-1}$; e Δt é número de segundos de um dia.

Caso o valor de VR_2' seja maior que o volume máximo do reservatório, o excesso de volume deve ser vertido, caso contrário o volume final desta primeira estimativa é adotado, isto é:

$$\begin{aligned} VR_2 &= VR_2' && \text{quando } VR_2' < V_{max}, \\ VR_2 &= V_{max} && \text{quando } VR_2' > V_{max} \end{aligned} \quad (2)$$

Neste último caso a vazão média vertida durante o intervalo de tempo é calculada por:

$$Q_v = \frac{VR'_2 - V_{\max}}{\Delta t} \quad (3)$$

Considerou-se que a área da superfície do reservatório é uma função linear do volume, isto é:

$$A = A_{\max} \frac{VR_1}{V_{\max}} \quad (4)$$

A área máxima de cada um dos açudes foi obtida a partir da digitalização de imagens de satélite. Os volumes máximos foram obtidos a partir de dados de cadastro dos açudes (quando disponíveis) ou a partir da reta de regressão descrita na figura 6.

Simulação de balanço hídrico nas lavouras de arroz

As 477 lavouras de arroz identificadas foram consideradas explicitamente na aplicação do modelo hidrológico MGB na bacia do rio Quaraí. Para representar o balanço hídrico no interior de cada área plantada com arroz foi utilizado um equacionamento semelhante ao utilizado para representar os reservatórios.

Inicialmente as lavouras de arroz foram identificadas a partir de uma classificação de imagens do satélite CBERS de duas datas diferentes: uma correspondendo ao período de preparo do solo e outra correspondendo ao período de irrigação. Os detalhes sobre esta classificação estão descritos em Collischonn e Collischonn (2009).

As lavouras de arroz foram identificadas por um código e cada lavoura foi conectada a uma fonte de água, que podia ser um açude ou um trecho de rio associado a uma minibacia do modelo. Esta conexão foi feita com base em imagens de satélite, de acordo com o tamanho das lavouras e com a proximidade entre estas e as fontes de água. Combinações de fontes também foram consideradas, de forma que era permitido a uma mesma lavoura retirar água de até 4 açudes e de um trecho de rio. Neste caso, as fontes foram ordenadas hierarquicamente, de forma que a lavoura só passa a retirar água de uma determinada fonte quando a fonte anterior tiver se esgotado (açude seco). Com isto, se pretendeu representar o fato de que os irrigantes podem demandar água do açude do vizinho ou de um trecho de rio próximo quando seu próprio açude se esgota, o que de fato pode ocorrer nesta bacia, de acordo com informações coletadas em campo (IPH/DNH, 2008). Por fim, em alguns casos, o açude-fonte identificado se encontrava fora da bacia, o que ocorreu no caso de lavouras muito próximas ao

divisor de águas, situação em que se considerou disponibilidade hídrica infinita, para simplificar a análise.

O método de irrigação utilizado na região, à época do estudo, era unicamente o de inundação. Por este método, uma lâmina de água de espessura variável entre 5 e 10 cm é mantida sobre a lavoura, com o uso de pequenos cordões de terra, denominados de taipas, que contornam os quadros da lavoura. No caso de uma precipitação excessiva, a água pode galgar as taipas e sair dos quadros. Nestes casos, as taipas podem romper-se, drenando acidentalmente a lavoura. A irrigação pode ser realizada com circulação de água entre os quadros ou com a lâmina estagnada, devendo sempre repor as perdas por evapotranspiração e por percolação. Também pode ser verificada a utilização da água drenada por um quadro ou por um conjunto de quadros para a irrigação de outras áreas, em um processo de recuperação da água no sistema de drenagem.

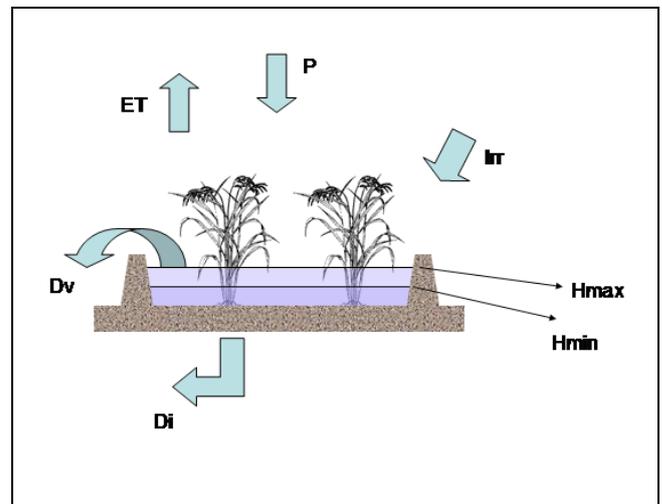


Figura 8 - Representação gráfica simplificada do balanço hídrico de áreas de lavoura de arroz, identificando os fluxos de água devidos à precipitação (P), irrigação (Irr), evapotranspiração (ET), drenagem através do solo (Di), drenagem por cima ou através das taipas durante períodos chuvosos (Dv).

O balanço hídrico de uma área de lavoura está representado na figura 8. A lavoura pode receber água da chuva (P) ou água do sistema de irrigação (Irr). A água armazenada na lavoura pode ser perdida para a atmosfera por evapotranspiração (ET), ou drenada através do solo (Di). Em períodos muito chuvosos, o excesso de água recebido em uma

lavoura é perdido por galgamento sobre as taipas (D_v).

Considerou-se que, durante o ciclo de irrigação, cada uma das lavouras seja operada com o objetivo de manter uma lâmina mínima de água (H_{min}). Também foi estabelecido um limite de uma lâmina máxima (H_{max}) de água, que não poderia ser superado mesmo em situações de muita chuva.

A equação utilizada para representar o balanço hídrico em cada uma das lavouras de arroz representadas no modelo é:

$$H_2 = H_1 + P - ET + Irr - D_i - D_v \quad (5)$$

onde H_2 é o nível da água na lavoura ao final do intervalo de tempo (mm) e H_1 é o nível da água no início do intervalo de tempo (mm). P é a lâmina de chuva ocorrida durante o dia (mm); ET é a evapotranspiração ao longo do dia (mm); Irr é a lâmina irrigada (mm); D_i é a perda de água da lavoura através de infiltração para o solo (mm); e D_v é a perda por galgamento das taipas.

O valor de P é obtido através de interpolação dos dados de precipitação observada nos postos pluviométricos mais próximos, utilizando a metodologia descrita em Collischonn (2001).

O valor de ET é obtido pela equação de Penman-Monteith considerando a resistência superficial igual a zero. Esta evapotranspiração é denominada ET_0 . Este valor ainda é corrigido pela equação abaixo, de acordo com Beirsdorf e Mota (1976), *apud* Mota (2000), para considerar a transpiração da planta:

$$ET = 0,91.ET_0 + 1,84 \quad (6)$$

em que ET e ET_0 têm unidades de mm (ou mm por dia), assim como a constante 1,84.

As perdas de água são calculadas a partir do nível da água em cada lavoura, no início do intervalo de tempo (H_1), de acordo com as equações que seguem:

$$D_i = \text{Perd}_{min} \quad \text{quando } H_1 > H_{min}$$

$$D_i = \text{Perd}_{min} \frac{H_1}{H_{min}} \quad \text{quando } H_1 < H_{min} \quad (7)$$

e

$$D_v = (\text{Perd}_{max} - \text{Perd}_{min}) \cdot \frac{(H_1 - H_{min})}{(H_{max} - H_{min})}$$

quando $H_1 \geq H_{min}$

$$D_v = 0 \quad \text{quando } H_1 < H_{min} \quad (8)$$

onde Perd_{max} e Perd_{min} são parâmetros que representam, respectivamente, as perdas que ocorrem quando o nível da água na lavoura é a mínima necessária (H_{min}) e quando o nível é máximo (H_{max}). Os valores adotados para estes parâmetros foram baseados em recomendações técnicas para o cultivo do arroz na região Sul (SOSBAI, 2005) e aparecem na Tabela 1.

A lâmina irrigada a cada dia varia com a época do ano e com as chuvas. O valor de Irr é calculado de tal forma que ao final do intervalo de tempo H_2 seja exatamente igual a H_{min} . Em dias sem chuva, a irrigação apenas compensa a evapotranspiração e as perdas por infiltração, ou seja, em dias sem chuva Irr é igual à soma de ET e D_i . Em dias chuvosos, a precipitação pode preencher parcial ou completamente a irrigação. Neste caso, Irr pode ser igual a zero.

O objetivo da irrigação é manter o nível da água na lavoura igual a H_{min} durante todo o período de cultivo. O valor H_{max} , por outro lado, representa um nível máximo que não pode ser ultrapassado. Se, ao final do intervalo de tempo, o nível H_2 for maior do que H_{max} , o valor de H_2 é reduzido para H_{max} e o excesso é somado a D_v , na forma de perdas adicionais.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros utilizados na representação das lavouras de arroz.

Parâmetro	Valor adotado	Descrição
H_{min}	50 mm	Nível mínimo que deve ser mantido na lavoura
H_{max}	100 mm	Nível máximo que pode ocorrer na lavoura
Perd_{min}	1 mm/dia	Perdas por infiltração quando o nível na lavoura é igual a H_{min}
Perd_{max}	45 mm/dia	Perdas por vertimento e rompimento de taipas quando o nível da água é igual a H_{max}

Considerou-se para as simulações que o período de cultivo do arroz é de 100 dias, e que o início do período de irrigação ocorre entre outubro e novembro. Cada lavoura pode ter um dia diferente de início de irrigação, de acordo com uma distribuição estatística do tipo uniforme, centrada no dia 1º

de novembro com variação de 15 dias para mais e para menos. Isto significa que algumas lavouras iniciam o período de irrigação no dia 17 de outubro, outras no dia 16 de novembro, e outras em cada um dos dias do período de 17 de outubro a 16 de novembro, com igual probabilidade.

O final do período de irrigação ocorre entre janeiro e fevereiro, quando são completados os 100 dias para cada uma das lavouras.

APLICAÇÃO

O modelo hidrológico foi aplicado considerando diferentes cenários de uso da água e de presença ou ausência dos reservatórios.

O primeiro cenário corresponde à situação atual, utilizada para a calibração. Neste cenário foram consideradas as retiradas de água, o armazenamento de água nos açudes e o retorno de parte da água da irrigação de volta para a rede de drenagem.

O segundo cenário corresponde à situação considerada original na bacia, sem a presença de reservatórios e sem os usos da água para irrigação de arroz. As vazões geradas pelo modelo neste cenário podem ser consideradas as vazões naturais da bacia, conforme discutido no início do artigo.

O terceiro cenário foi idealizado para avaliar a influência que a simples presença dos açudes exerce sobre o regime hidrológico da bacia. Para isto, foram incluídos os reservatórios na simulação, mas não foram consideradas as retiradas de água para irrigação.

No quarto cenário foram incluídas as retiradas de água dos reservatórios, mas não foram incluídas as retiradas de água dos rios. O objetivo deste cenário foi verificar separadamente o impacto da retirada de água dos rios e dos açudes sobre a disponibilidade de água nos rios.

O quinto cenário é igual ao primeiro, exceto pela ausência de retorno de água da irrigação. O objetivo deste cenário foi avaliar o quanto a água de retorno da irrigação afeta a disponibilidade de água na bacia.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Cenário 1: Calibração do modelo

O modelo foi calibrado de forma a obter o ajuste dos hidrogramas e da curva chave no posto

fluviométrico de Artigas (Uruguai), vizinha à cidade brasileira de Quaraí, cujos dados foram obtidos através do projeto Twinlatin (IPH/DNH, 2008). Considerando que tanto os açudes como o uso da água para irrigação de arroz existem há muito tempo na bacia, o modelo foi calibrado considerando os usos da água para irrigação e os açudes existentes.

O procedimento de calibração do modelo chuva-vazão teve 3 etapas: 1) atribuição de valor inicial dos parâmetros, a partir do ajuste de bacias vizinhas já calibradas (Collischonn et al. 2007b); 2) ajustamento manual dos parâmetros mais sensíveis; 3) ajuste fino através de um procedimento de calibração multobjetivo.

Os resultados da calibração podem ser observados na figura 9, que apresenta os hidrogramas observado e calculado em Quaraí/Artigas, durante o primeiro semestre do ano de 1982.

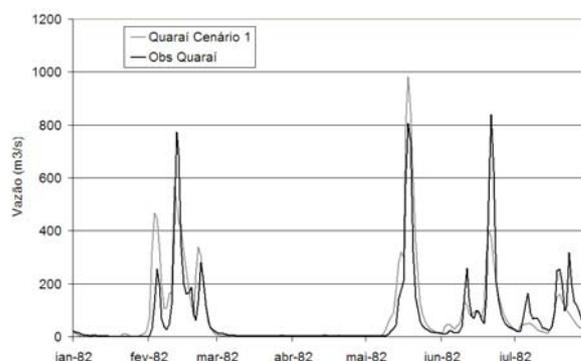


Figura 9 - Hidrogramas calculado (cinza) e observado (preto) em Quaraí/Artigas, durante o período de calibração do modelo hidrológico.

Pode-se observar que o ajuste dos hidrogramas é relativamente bom, embora alguns picos tenham sido subestimados e outros superestimados. Um aspecto que se destaca nos hidrogramas do rio Quaraí, são as vazões mínimas, cujos valores são muito baixos (menos de $0,2 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$).

A figura 10 apresenta os hidrogramas observado e calculado no período de 1994 a 1995, com o eixo vertical em escala logarítmica, destacando as vazões mínimas.

Observa-se que as vazões simuladas acompanham o comportamento geral das vazões observadas, com mínimas mais elevadas durante o inverno e mais baixas durante o verão. Observa-se, inclusive, que as vazões observadas tendem a zero no final do período, quando se inicia um período de falhas de observação. Complementarmente, a figura 11

mostra o ajuste em termos da curva de permanência observada em Artigas e da curva obtida dos dados calculados no mesmo local.

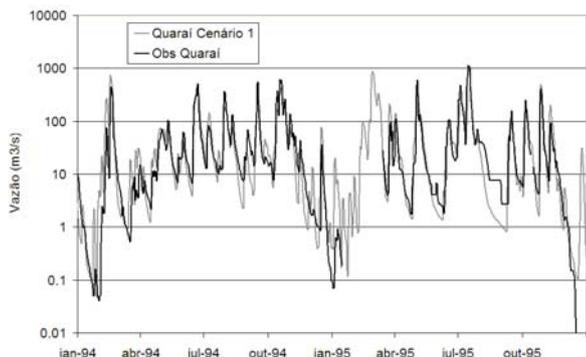


Figura 10 - Hidrogramas observado (preto) e calculado (cinza) do rio Quaraí em Artigas/Quaraí no período de 1994 a 1995 (em escala vertical logarítmica para destacar vazões mínimas).

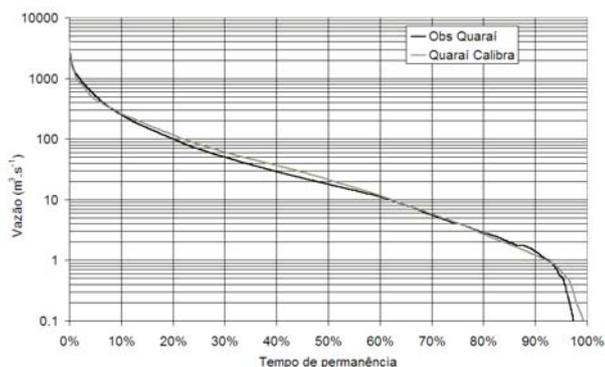


Figura 11 - Curvas de permanência calculada e observada em Quaraí/Artigas, no período de 1980 a 2004.

A verificação do modelo foi realizada utilizando dados de uma estação fluviométrica que não foram considerados no momento da calibração. Os dados utilizados vêm da estação Javier de Viana, localizado no Arroio Tres Cruces, afluente do rio Quaraí em território uruguaio. A área de drenagem no local da estação fluviométrica é de 580 km².

Os hidrogramas calculado e observado no Arroio Tres Cruces durante o ano de 1995 são apresentados na figura 12. Observa-se que os maiores picos de cheia são superestimados pelo modelo, porém visualmente os hidrogramas apresentam, em geral, uma boa concordância.

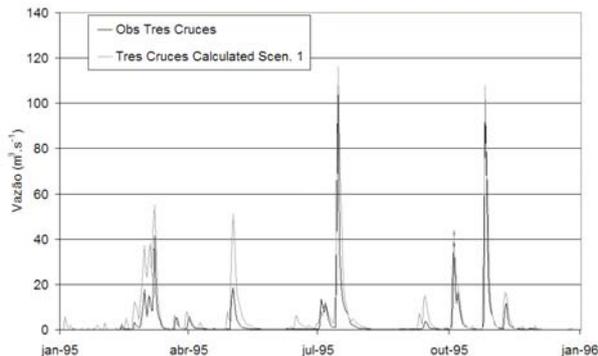


Figura 12 - Hidrogramas observado (linha preta) e calculado (linha cinza) na estação Javier de Viana no Arroio Tres Cruces, afluente do rio Quaraí.

A figura 13 apresenta uma comparação dos hidrogramas do Arroio Tres Cruces durante o ano de 1998, utilizando uma escala logarítmica para destacar as vazões mais baixas. Observa-se que o modelo é capaz de gerar vazões mínimas bastante próximas das observadas.

Com base nestes resultados considerou-se que o modelo MGB-IPH pode ser utilizado para gerar séries de vazões em locais não monitorados.

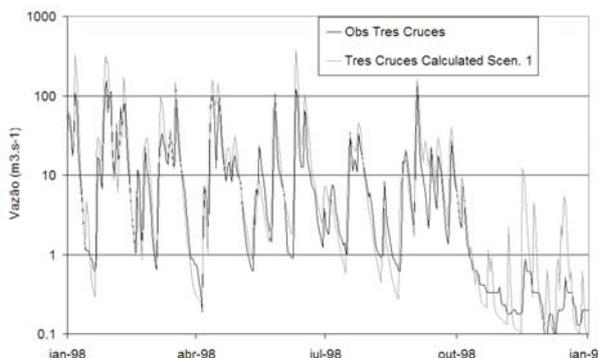


Figura 13 - Hidrogramas observado (linha preta) e calculado (linha cinza) na estação Javier de Viana no Arroio Três Cruces, afluente do rio Quaraí.

As estimativas de necessidade hídrica das plantações de arroz irrigado por inundação são muito variáveis, dependendo do tipo de manejo, das perdas por retorno e das características do solo e do clima da região. Forgiarini *et al.* (2008) sugerem valores de consumo de 8.500 a 10.500 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ para o cultivo de arroz no Rio Grande do Sul, sendo que este valor pode variar de acordo com o tipo de

manejo, das perdas por retorno e das características do solo e do clima da região.

Na calibração do modelo MGB-IPH para a bacia do rio Quaraí, as demandas de água para irrigação foram incluídas, porém as demandas foram calculadas internamente ao próprio modelo, procurando satisfazer a necessidade de manter uma lâmina de água mínima ao longo do ciclo de cultivo, conforme descrito anteriormente. Como resultado, a demanda calculada foi diferente em cada ano e em cada lavoura. O valor total variou entre pouco menos de 10.000 e pouco mais de 16.000 m³.ha⁻¹.ciclo⁻¹. A demanda de irrigação é maior nos anos em que chove menos e um pouco menor quando chove mais, porque o consumo total de água corresponde à demanda satisfeita por irrigação somada à chuva que atinge diretamente a lavoura. A demanda de água satisfeita apenas pela irrigação, que é suplementar à chuva, variou em torno de 8000 m³.ha⁻¹.ciclo⁻¹. Este valor é próximo, porém um pouco inferior aos valores encontrados em Forgiarini et al. (2008), o que leva a crer que as perdas de água adotadas na modelagem estão sendo subestimadas.

Os resultados do modelo no cenário 1 também indicam que ocorrem freqüentes situações de escassez na bacia, em que a demanda de diversas áreas agrícolas não pode ser atendida. Isto ocorre quando o trecho de rio ou o açude de onde é retirada a água encontra-se seco. Para cada uma das 477 lavouras, foi computado o número de dias ao longo dos períodos de cultivo em que houve déficit hídrico, ou seja, a necessidade de irrigação para manter a lâmina mínima não foi atendida. Em 186 lavouras ocorreu déficit de atendimento de irrigação em mais de 600 dias ao longo dos 27 anos de simulação, condição esta considerada mais crítica.

Cenário 2: Vazões naturais

O cenário de vazões naturais foi obtido a partir de uma simulação sem a presença dos açudes e das retiradas de água para irrigação. A figura 14 apresenta as curvas de permanência do rio Quaraí junto à cidade de Quaraí nos cenários 1 e 2, e a figura 15 apresenta as curvas de permanência no exutório da bacia, referentes ao período de 1980 a 2006. Observa-se que as vazões são mais altas no cenário de vazões naturais (cenário 2) do que no cenário atual (cenário 1), como era esperado. Na seção transversal do rio junto à cidade de Quaraí, por exemplo, a vazão Q₉₀ passa de 1,2 m³.s⁻¹ (cenário 1) para 1,4 m³.s⁻¹ (cenário 2), e na foz a vazão Q₉₀

passa de 2,9 m³.s⁻¹ (cenário 1) para 8,0 m³.s⁻¹ (cenário 1).

A diferença de vazão entre os cenários é maior no exutório da bacia do que na seção localizada junto à cidade de Quaraí. Isto ocorre porque a maior parte das demandas está concentrada a jusante da cidade de Quaraí.

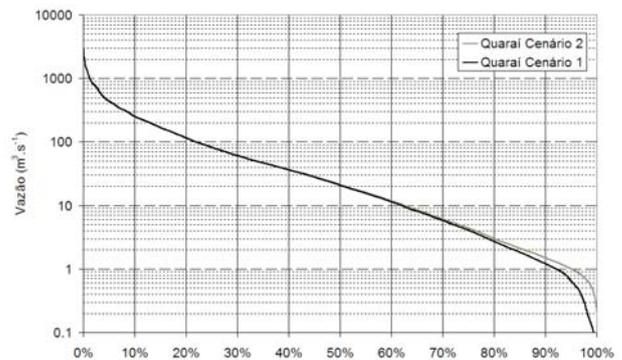


Figura 14 - Curvas de permanência de vazões do rio Quaraí junto à cidade de Quaraí, no cenário 1 (situação atual, com açudes e retiradas de água) e cenário 2 (vazão natural, sem açudes e sem retiradas de água).

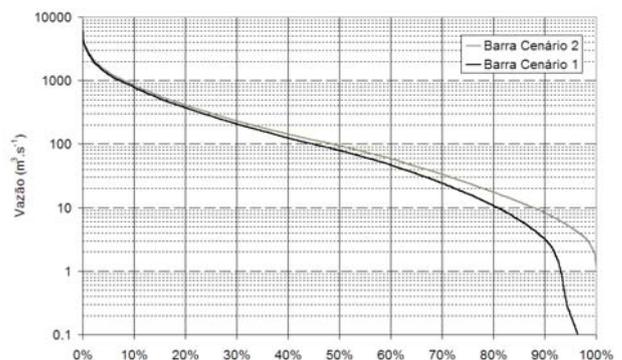


Figura 15 - Curvas de permanência de vazões do rio Quaraí na foz, em Barra do Quaraí, no cenário 1 (situação atual, com açudes e retiradas de água) e cenário 2 (vazão natural, sem açudes e sem retiradas de água).

Observa-se na figura 15 que o rio Quaraí chega a secar (valores menores do que 0,1 m³.s⁻¹) em alguns casos no cenário 1, e que a vazão Q₉₅ é praticamente zero (0,2 m³.s⁻¹), enquanto a vazão natural na mesma situação é de 4,9 m³.s⁻¹.

Cenário 3: Influência dos Açudes

O cenário 3 é baseado no cenário 2, porém inclui os açudes, ou reservatórios, na simulação. Entretanto, não são consideradas as retiradas de água tanto dos açudes como dos trechos de rio. Este cenário corresponderia à disponibilidade hídrica atual da bacia, dada a infraestrutura de armazenamento instalada na bacia. O resultado pode ser observado nas curvas de permanência apresentadas na figura 16, que mostra as curvas de permanência do rio Quaraí na sua foz, em Barra do Quaraí, no período de 1980 a 2006. Percebe-se que a vazão Q_{90} é reduzida de cerca de $8,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (cenário 2) para $6,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (cenário 3).

À primeira vista o resultado apresentado na figura 16 parece contraditório, uma vez que a inclusão de reservatórios deveria aumentar a regularização de vazões, com conseqüente aumento de vazões mínimas, como a Q_{90} . Entretanto, na simulação do cenário 3, considerou-se que não há vazão de saída dos reservatórios a não ser que o volume máximo tenha sido atingido. Assim, a influência destes reservatórios restringe-se a aumentar o consumo de água por evaporação, o que explica a redução nas vazões mínimas.

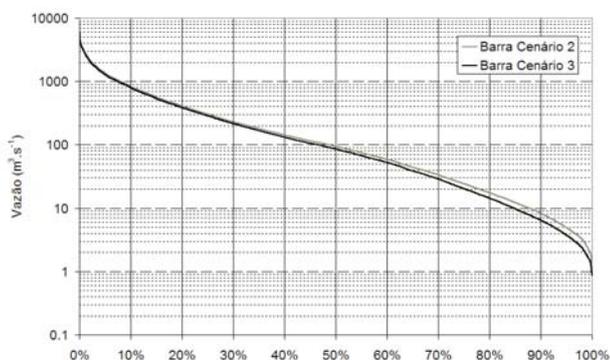


Figura 16 - Curvas de permanência de vazões do rio Quaraí na foz, em Barra do Quaraí, no cenário 2 (vazão natural, sem açudes e sem retiradas de água) e no cenário 3 (com a presença de açudes, mas sem retiradas de água).

Cenário 4: Retirada de água dos açudes

O cenário 4 é semelhante ao cenário 3, porém foram incluídas as retiradas de água dos reservatórios. A diferença entre o cenário 4 e o cenário 1 é que no cenário 4 não existem as demandas que

retiram água diretamente dos trechos de rio. O objetivo deste cenário foi verificar separadamente o impacto da retirada de água dos rios e dos açudes sobre a disponibilidade de água nos rios.

Os resultados deste cenário indicam que praticamente não há alteração da curva de permanência entre o cenário 3 e o cenário 4. A vazão Q_{90} na foz do rio Quaraí passa de $6,44 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no cenário 3 para $6,20 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no cenário 4. Isto significa que a influência da retirada de água dos açudes sobre as vazões mínimas é menos impactante que a própria presença dos açudes na bacia. Embora este resultado seja bastante intuitivo, entende-se que o modelo desenvolvido é uma ferramenta que permite quantificar este efeito.

É claro que estes resultados devem ser interpretados com cuidado, já que se referem ao modelo desenvolvido na bacia do Quaraí, e não a medições específicas no campo.

Cenário 5: Influência da vazão de retorno

O quinto cenário é igual ao primeiro, exceto pela ausência de retorno de água da irrigação. O objetivo deste cenário foi avaliar o quanto a vazão de retorno da irrigação afeta a disponibilidade de água na bacia. No modelo hidrológico, a vazão de retorno surge porque as perdas, cujos parâmetros são descritos na tabela 1, produzem um retorno de água para o sistema de drenagem da bacia.

Os resultados mostram que não existe diferença significativa entre as curvas de permanência dos cenários 1 e 5. A vazão Q_{90} , por exemplo, é de $3,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no cenário 1 (que considera o retorno da água das lavouras) e de $3,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ no cenário 5 (que não considera o retorno da água das lavouras).

Este resultado é, de certa forma, surpreendente, uma vez que existem cerca de 700 km^2 de plantações de arroz na bacia. Considerando perdas de 1 mm por dia nesta área, conforme o parâmetro de perdas utilizado (tabela 1), e considerando que as perdas atingiriam a rede de drenagem, o retorno da água representaria um aumento de $8,1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ na foz do rio Quaraí.

A pequena diferença entre as vazões dos cenários 1 e 5 pode ser explicada pelo fato da vazão de retorno estar sendo reutilizada nas lavouras localizadas a jusante das áreas onde é gerada, ou então acaba sendo perdida por evaporação no solo ou em reservatórios a jusante, dado que o balanço entre precipitação e evaporação na época do cultivo é predominantemente deficitário.

CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um modelo hidrológico da bacia do rio Quaraí, na fronteira do Brasil com o Uruguai, desenvolvido com o foco específico de analisar os impactos do intenso uso da água para irrigação de arroz e da presença de centenas de pequenos reservatórios sobre os quais existem poucas informações.

O modelo MGB-IPH foi adaptado para estas simulações, tendo sido adotada uma metodologia de divisão da bacia em mini-bacias. Esta forma de discretização da bacia mostrou ter vantagens em relação à discretização tradicional, baseada em células regulares quadradas.

Reservatórios e lavouras de cultivo de arroz foram incluídos no modelo e representados de forma explícita e individual nas simulações.

Foram simulados cenários com diferentes graus de consumo de água e de intervenção humana no ciclo hidrológico.

As vazões naturais da bacia foram obtidas através da simulação com o modelo hidrológico sem considerar as influências humanas de retirada de água ou presença de açudes.

Os resultados indicam que a bacia do rio Quaraí tem demanda de água superior à disponibilidade, mesmo considerando a existência de muitos reservatórios. As vazões do rio Quaraí se aproximam de zero frequentemente, e sua Q_{05} é reduzida de 4,9 para $0,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ do cenário 2 (natural) para o cenário 1 (atual), mostrando que o conjunto de reservatórios e a demanda intensa acarretam uma redução superior a 95% nas vazões de estiagem. Na prática, isto significa que alguns trechos do rio estão secando com alguma frequência, o que não ocorre no cenário natural. É possível que o conflito entre demanda e oferta de água na bacia do rio Quaraí seja atenuado pela existência de um longo trecho final do rio em que ocorre remanso por parte do rio Uruguai, sendo que as demandas de água localizadas neste trecho estão, na verdade, utilizando água do rio Uruguai.

Foram identificados mais de 400 reservatórios com mais de 3 ha de área superficial na bacia. Estes reservatórios não são operados com descarregadores de fundo ou com algum outro mecanismo que permita regularizar a vazão. Em consequência, a simples presença destes açudes, localizados nas cabeceiras dos afluentes, implica numa redução da vazão do rio porque parte da água é consumida pela evaporação. A retirada de água para irrigação a partir dos açudes não afeta muito mais as vazões do rio

Quaraí do que a presença dos reservatórios em si. Por outro lado, a inclusão das retiradas de água diretamente a partir dos trechos de rio é que causa uma grande diminuição na disponibilidade de água para jusante. Estes resultados, embora intuitivos, são importantes porque o modelo se constitui numa ferramenta para sua quantificação efetiva, permitindo avaliar o impacto de novas infra-estruturas de armazenamento na hidrologia da bacia.

Cabe destacar a importância destes reservatórios para a garantia de suprimento de água para irrigação de arroz. Atualmente são cultivados cerca de 72.000 ha de arroz na bacia do Quaraí, sendo 48.000 no Brasil e 24.000 em território uruguaio. Na hipótese de não-existência deste conjunto de infra-estruturas de armazenamento, e supondo um consumo específico relativamente baixo (cerca de $1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), seria possível cultivar apenas cerca de 4.900 ha, desde que totalmente utilizada a vazão natural de estiagem de $4,9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto, como demonstrado na comparação entre os cenários 2 e 3, os reservatórios causam uma diminuição das vazões de estiagem nos rios principais, aumentando os riscos de falta de água para irrigantes e demais usuários que dependem unicamente destes mananciais. Dito de outra forma, pelos cenários 2 e 3, apenas os irrigantes que possuem reservatórios têm um maior nível de garantia de atendimento das necessidades hídricas de suas lavouras.

A análise do efeito das vazões de retorno das lavouras sobre a disponibilidade não foi conclusiva, porque o retorno das lavouras de montante apenas serviu para reduzir o déficit nas lavouras de jusante, não alterando a vazão disponível no rio Quaraí. O modelo adotado para representar as perdas da irrigação e as vazões de retorno poderia ser aprimorado através do monitoramento completo do balanço hídrico de uma lavoura na região. No entanto, dado o pequeno efeito sobre a hidrologia da bacia como um todo, este aprimoramento provavelmente não alteraria muito as conclusões obtidas.

REFERÊNCIAS

- Campos, J.N.B., Vieira Neto, J., Queiroz, E.A. 2000, Impacto cumulativo da pequena açudagem: Estudo de caso do açude Várzea do Boi, em Tauá-CE. *Anais do V Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 1, pp. 231-237.
- Collischonn, B.; Collischonn, W. 2009 Classificação multitemporal de uso do solo usando imagens CBERS para fins de simulação e gerenciamento de recursos hí-

- dricos na bacia do rio Quaraí. *Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Natal, Brazil
- Collischonn, B.; Collischonn, W.; Agra, S.; Bortoli, C. 2007a "Reconstituição das vazões naturais do Rio Caí (RS) a jusante da transposição de vazões do Sistema Salto". *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, São Paulo, 25 a 29 de novembro.
- Collischonn, W., Allasia, D., Silva, B.C., Tucci, C.E.M., 2007b. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal* 52 (5).
- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. 2001 Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 6 No. 1.
- Cruz, J. C.; Silveira, G. L. Disponibilidade hídrica para outorga em bacias com elevado uso consuntivo (i): avaliação por SHR. Volume 4 n° 2 (jul/dez/2007). *REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina*, v. 4, p. 51-64, 2007.
- Forgiarini, F. R., Silveira, G. L., Cruz, J. C.. Modelagem da Cobrança pelo uso da Água Bruta na Bacia do Rio Santa Maria/RS: I Estratégia Metodológica e Adaptação à Bacia. (Jan/Mar). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, p. 65-77, 2008.
- Güntner A., Krol M.S., de Araujo J.C., Bronstert A. 2004 Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. *Hydrological Sciences Journal*, 49 (5), pp. 901-918.
- Martins, E. S. P. R.; Menescal, R. A.; Sherer-Warren, M.; Carvalho, M. S. B. S.; Melo, M. S.; Perini, D. S.; Oliveira, F. A. J. 2007 Utilização de imagens CBERS para mapeamento dos espelhos d'água do Brasil. *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis.
- Mota, F. S. (2000): "Influência dos fenômenos El Niño e La Niña sobre a necessidade de irrigação do arroz em Pelotas (RS)". *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v. 8, n° 1.
- Olivera, F., M. Valenzuela, R. Srinivasan, J. Choi, H. Cho, S. Koka, and A. Agrawal, ArcGIS-SWAT: A Geodata Model and GIS Interface for SWAT, *Journal of the American Water Resources Association* 42 (2): 295 - 309, 2006.
- Payan, J.-L.; Perrin, C.; Andreassian, V.; Michel, C. 2008 How can man-made water reservoirs be accounted for in a lumped rainfall-runoff model? *Water Resources Research* Volume 44, Issue 3, March 2008, Article number W03420.
- Paz, A. R.; Collischonn, W. 2007 River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology*, Vol 343 pp. 127-139.
- Paz, A. R.; Collischonn, W.; Silveira, A. L. L. 2006 Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research* V.42 n. 8.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, A.; Bamler, R. 2003 The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57 pp. 241– 262.
- Sawunyama, T.; Senzanje, A.; Mhizha A. 2006 Estimation of small reservoir storage capacities in Limpopo River Basin using geographical information systems (GIS) and remotely sensed surface areas: Case of Mzingwane catchment. *Physics and Chemistry of the Earth* 31 pp. 935–943.
- Schettini, E.B.; Collischonn, W.; Meirelles, F.S.C.; Larentis, D.; Collischonn, B.; Paiva, R.C.D.; 2007. "Projeto Twin-Latin – Bacia do Quaraí: Modelo integrado chuva-vazão com balanço hídrico de açudes e lavouras". Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS.
- Silans, A. M. B.; Almeida, C. N.; Albuquerque, D. J.; Paiva, A. E. D. B. 2000 Aplicação do modelo AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, V. 5 n. 3 p. 5-19.
- SOSBAI 2005 *Arroz Irrigado: Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil*. Editado pela Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. 159p.
- Sun, G.; Ranson, K. J.; Kharuk, V. I.; Kovacs, K. 2003 Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment* 88 pp. 401–411.
- Tucci, C.E.M. 2005 "Modelos Hidrológicos". Ed. UFRGS/ABRH, Porto Alegre.
- WMO 2003 *Projeto Piloto Gestão Integrada de Cheias na Bacia Hidrográfica transfronteiriça (Brasil/Uruguai) do Rio Quaraí/Cuareim*. IPH-DNH.

Hydrological Modeling of a Basin With Intensive Water Use: The Case of Quaraí River in Brazil

ABSTRACT

Often information about small intensively used river basins and small reservoirs is incomplete in Brazil. The hydrological series from rivergaging stations in these basins are usually heavily affected by human activities. A hydrological model can allow a more detailed analysis of basins with these characteristics seeking to identify the impacts of irrigation and regulation of on water availability. This article presents an application of the MGB-IPH model to the Quaraí river basin on the border between Brazil and Uruguay. For this application, three important modifications were performed in the model: discretization of

the basin into small sub-basins, instead of the traditional discretization into square cells; simulation of a large number of small reservoirs; and explicit and individual simulation of irrigated rice crops. The hydrological model was calibrated taking into account the influence of water retrieval for irrigation and the presence of reservoirs. Later the model was applied considering a natural scenario – without the presence of the small dams and water retrieval – and other scenarios attempting to isolate the influence of reservoirs and water retrieval; The results show that water demand is greater than its availability in the basin, and that water retrieval directly from rivers has a greater impact than the retrieval of water from the small dams in water availability in general.

Key-words: *irrigation, reservoirs, hydrological model, Quaraí river basin.*