

# Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água

Margarita Pereira  
Rafael Bloedow Kayser  
Walter Collischonn

**RESUMO:** Os procedimentos para decidir tecnicamente sobre pedidos de outorga de direito de uso da água envolvem etapas de comparação entre a demanda e a disponibilidade de água, as quais têm forte relação com os atributos espaciais da rede de drenagem e da localização dos diferentes usuários de água em uma bacia hidrográfica. Idealmente, portanto, modelos hidrológicos utilizados para analisar a disponibilidade de água nos locais onde a outorga é solicitada deveriam ser integrados a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Neste trabalho apresentamos uma metodologia de integração de modelos hidrológicos e SIG para auxílio à tomada de decisão em pedidos de outorga de direito de uso da água. A metodologia envolve: 1) a utilização de SIG para pré-processamento de dados visando a aplicação de um modelo hidrológico chuva-vazão; 2) a aplicação do modelo chuva-vazão para gerar estimativas da vazão de referência adotada como disponibilidade hídrica em cada trecho de rio em que é dividida a bacia; 3) a transferência dos resultados do modelo hidrológico de volta ao SIG; e 4) a aplicação de um Sistema de Suporte à Decisão no qual cálculos simples de balanço hídrico são realizados internamente em um SIG. É apresentado um teste da metodologia na bacia do rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul-Brasil, região em que as demandas ultrapassam a disponibilidade de água. Os resultados no estudo de caso demonstraram que é possível aprimorar a metodologia de análise de outorga ao integrar SIG e modelagem hidrológica para auxílio à tomada de decisão, facilitando assim o aproveitamento sustentável dos recursos hídricos numa bacia baseados no conhecimento da variabilidade sazonal e espacial da sua disponibilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** outorga; modelos hidrológicos; SIG; modelos de suporte à decisão.

**ABSTRACT:** The procedures for technical deciding about water use permits, involve steps of comparison between demand and availability of water which has a strong relationship between the spatial attributes of the drainage network and the location of different water users in a watershed. Therefore, ideally, the models used to make these analyses should be integrated into a Geographic Information System - GIS. We propose a methodology for integrating GIS and hydrological models to support decision making in analysis of water use permits requests. The methodology involves 1) the use of GIS for pre-processing of data for the application of a rainfall runoff hydrologic model; 2) the application of rainfall-runoff model to generate estimates of the flow of reference adopted as water availability in every stretch of river; 3) transfer the results of the hydrological model back to the GIS; and 4) the application of a Decision Support System in which simple calculations of water balance are done entirely in GIS environment. The presented methodology was tested at the Dos Sinos River basin, at Rio Grande do Sul, Brazil, region where the demands exceed the water availability. The results of this case study showed that it is possible to improve the methodology used to analyze the granting of water rights for use permits when GIS and hydrological models are integrated.

**KEYWORDS:** water use permits; Geographic Information System; geoprocessing; hydrological models; decision support models.

## INTRODUÇÃO

No Brasil, a Lei 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, elenca entre os seus instrumentos a outorga de direito de uso de recursos hídricos. A outorga de recursos hídricos é uma autorização de uso de caráter administrativo que depende de uma série de análises técnicas de parte dos órgãos gestores outorgantes de recursos hídricos. De forma sucinta, estas análises dizem respeito, por um lado, à eficiência na utilização de água por cada setor usuário e, por outro, à capacidade do corpo hídrico de atender à demanda solicitada (captação ou lançamento), considerando os demais usos já existentes e a hidrologia local (Silva & Pruski, 2000; Collischonn & Lopes, 2008).

A decisão sobre a outorga cabe a um órgão do governo federal ou estadual. No caso de rios de dominialidade federal (i.e. rios que passam por mais de um estado ou de um país), a decisão cabe à Agência Nacional de Águas (ANA). No caso de um rio de dominialidade estadual a decisão cabe a órgão do governo estadual, como a Secretaria Estadual de Recursos Hídricos, ou o Departamento de Recursos Hídricos, subordinado a alguma outra secretaria.

Em geral, a metodologia de verificação de disponibilidade ocorre em três etapas (Collischonn & Lopes, 2008):

1. Determinação da disponibilidade hídrica, através de extrapolação de dados de uma estação fluviométrica próxima, regionalização de vazões, vazão regularizada por reservatório ou outro método adequado;
2. Identificação de todas as demandas existentes na bacia a montante do ponto de demanda, podendo ser os usuários outorgados (federais e estaduais) e os usos identificados através de planos e estudos;
3. Cálculo de indicadores, determinando qual a porcentagem da disponibilidade hídrica local é comprometida individualmente pelo usuário e qual é o grau de comprometimento total, considerando todos os usuários.

Em muitos casos as análises de disponibilidade hídrica ainda exigem que os técnicos analisem mapas em papel, relatórios e utilizem planilhas de cálculo de uma forma não integrada, e com muitos procedimentos manuais. Em outras palavras, não existe uma integração adequada entre a base de dados geográficos e a metodologia de análise dos pedidos de outorga.

Em consequência disso, a análise é mais demorada, mais sujeita a erros e mais dependente de quem é o técnico que está realizando a análise.

Uma alternativa interessante para agilizar o processo de análise de pedidos de outorga é o desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD). Segundo Porto et al. (1997), os SSD são sistemas computacionais constituídos por bases de dados e modelos matemáticos, que, interagindo entre si, através de uma interface gráfica, têm por objetivo auxiliar indivíduos que tomam decisões na solução de problemas não estruturados (ou parcialmente estruturados). Problemas não estruturados são aqueles para os quais não existem soluções através de algoritmos bem definidos e, por isso não são facilmente tratáveis por computador. Em consequência, a solução destes problemas exige uma estreita interação entre homem e máquina, fato que constitui uma das principais características dos SSD.

Um exemplo de SSD para outorga que vem sendo desenvolvido dentro da ANA é o Sistema de Controle de Balanço Hídrico para a bacia do rio São Francisco (Collischonn & Lopes, 2008). Este mesmo sistema vem sendo aplicado com sucesso em outras bacias como a do rio Paraná e rio Grande (Collischonn & Lopes, 2009).

Outro exemplo é o Sistema de Suporte à Decisão para a Gestão Quali-Quantitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo uso da Água, proposto por Rodrigues (2005), com aplicações na bacia do rio Jundiá e na bacia do rio Paraíba do Sul.

Entretanto, uma carência de alguns destes sistemas é que normalmente não são integrados a um Sistema de Informação Geográfica.

Considerando que as decisões sobre outorga têm forte relação com dados de disponibilidade hídrica que poderiam ser produtos da modelagem hidrológica, com os atributos espaciais da rede de drenagem e com a localização dos diferentes usuários de água; os sistemas utilizados para analisar estes pedidos deveriam, idealmente, integrar modelos hidrológicos e Sistemas de Informação Geográfica num esquema de integração flexível, com uma interfase de articulação comum para descrever processos complexos de forma abrangente. Nesse sentido Sui & Maggio (1999) descreveram amplamente as práticas, problemas, perspectivas e importância dessa integração assim como os diferentes tipos de acoplamentos possíveis entre modelos hidrológicos e SIG.

Neste trabalho apresentamos uma metodologia de integração de modelos hidrológicos e SIG para auxílio

à tomada de decisão em pedidos de outorga de uso da água. A metodologia envolve: 1) a utilização de SIG para pré-processamento de dados visando a aplicação de um modelo hidrológico chuva-vazão; 2) a aplicação do modelo chuva-vazão para gerar estimativas da vazão de referência adotada como disponibilidade hídrica em cada trecho de rio da bacia; 3) a transferência dos resultados do modelo hidrológico de volta ao SIG; e 4) a aplicação de um Sistema de Suporte à Decisão no qual cálculos simples de balanço hídrico são realizados internamente no próprio SIG. Também é apresentado um teste da metodologia na bacia do rio dos Sinos, no Rio Grande do Sul, região em que as demandas ultrapassam a disponibilidade de água.

## METODOLOGIA

Propõe-se integrar uma metodologia de cálculo de disponibilidade hídrica e ferramentas de suporte à tomada de decisão num ambiente de banco de dados georeferenciados, mais especificamente em ambiente SIG, onde, através desta integração, seja possível facilitar as análises técnicas prévias necessárias para tomada de decisões, com ênfase na avaliação de pedidos de outorga quantitativa.

Para atender a este objetivo foi desenvolvida uma metodologia que inclui um SIG, um modelo hidrológico chuva-vazão distribuído e um sistema de apoio à decisão integrado ao SIG.

A função do SIG é, primeiramente, realizar as etapas de pré-processamento necessárias para o cálculo das disponibilidades hídricas na bacia. Para isto foi utilizado o conjunto de ferramentas e funções relacionadas a cursos hídricos denominado ArcHydro (Maidment, 2002). Os conceitos e ferramentas do ArcHydro que permitem a análise da rede de drenagem, com base em representações vetoriais de elementos da rede (por. exemplo, rios como linhas e bacias como polígonos) e suas correspondentes tabelas de atributos, permitem a organização e pré-processamento geoespacial e temporal de dados em um sistema de informação geográfica para uso em modelos de simulação hidrológica e hidráulica (Whiteaker et al., 2006). O ArcHydro analisa os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e estima as variáveis hidrológicas de forma automática aumentando a efetividade e precisão na obtenção dessas variáveis que posteriormente podem ser utilizadas como dados de entrada em simulações hidrológicas. No caso do presente estudo uma das funções principais do ArcHydro consiste na discretização da bacia

de uma forma coerente em pequenas sub-bacias, denominadas aqui mini-bacias.

O cálculo das disponibilidades de água é realizado utilizando um modelo chuva-vazão distribuído que no caso do presente estudo é o Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB-IPH (Collischonn, 2001; Collischonn et al., 2007).

Por fim, foi aplicado um Sistema de Suporte à Decisão para outorga integrado ao SIG. Neste passo a bacia foi dividida aplicando exatamente a mesma discretização utilizada na aplicação do modelo MGB-IPH. Os resultados do modelo hidrológico em cada uma das mini-bacias foram transferidos ao SIG, e o Sistema de Suporte à Decisão foi testado considerando o caso da bacia do rio dos Sinos, uma das mais críticas em termos de poluição e extração de água para usos múltiplos do Rio Grande do Sul.

## Discretização da bacia usando ArcHydro

Uma etapa fundamental na metodologia é a discretização da bacia hidrográfica. A discretização consiste na divisão da bacia em unidades menores e a organização destas unidades menores segundo um ordenamento topológico.

Existem vários métodos de discretização de bacias, que podem subdividir a área em unidades regulares, como quadrados e retângulos; ou em unidades irregulares, sendo usadas neste caso tipicamente as sub-bacias. O modelo Açumod (Silans et al., 2000) e as primeiras versões do modelo MGB-IPH (Collischonn, 2001), por exemplo, adotam uma estrutura de unidades regulares (células quadradas). Algumas versões mais recentes do modelo MGB-IPH, adotam uma subdivisão da bacia em sub-bacias, ou mini-bacias (Getirana, 2009; Collischonn, 2009; Paiva, 2009).

Entre os métodos de divisão da bacia em sub-bacias, destacam-se os de Otto Pfaffstetter (Verdin & Verdin, 1999), adotado na ANA, e o método adotado no conjunto de ferramentas e conceitos denominado ArcHydro (Maidment, 2002). O método de Pfaffstetter é interessante porque além da divisão da bacia, define um método de codificação inteligente de cada sub-bacia, em que através do código da sub-bacia é possível fazer inferências sobre sua posição na bacia. Em outras palavras, a estrutura topológica da bacia, dividida em pequenas sub-bacias, está definida pela codificação.

O método do ArcHydro, por outro lado, define a topologia da bacia através de uma tabela de atri-

butos, em que cada sub-bacia apresenta um código identificador próprio e um código identificador da sub-bacia localizada imediatamente a jusante. Assim, a partir da tabela de atributos das sub-bacias, é possível identificar facilmente a topologia das bacias e da rede de drenagem.

Os conceitos e métodos do ArcHydro também vêm sendo utilizados nas etapas de pré-processamento de diversos modelos hidrológicos, como o HEC-HMS (Peters et al., 1995) e SWAT (Arnold et al., 1998) e também é adotado no presente estudo.

A discretização é realizada em várias etapas, todas elas dentro do software de SIG, especificamente o ArcGIS, e através do conjunto de ferramentas ArcHydro, com base no Modelo Digital de Elevação (MDE). As etapas são brevemente apresentadas nos parágrafos que seguem e são mais detalhadamente explicadas em Mainardi et al. (2009).

A primeira etapa é a determinação de direções de fluxo e consiste em analisar o MDE para definir, para cada pixel, uma única direção de fluxo da água. O resultado é uma imagem raster onde a cada pixel é atribuído um valor ou código que denota para qual dos vizinhos ele drena. Quase sempre esta etapa inclui alguma metodologia para remoção de depressões espúrias no MDE, conforme discutido em Buarque et al. (2009).

A segunda etapa é a determinação de área de drenagem acumulada. Nesta etapa é gerada uma nova imagem raster onde cada pixel tem como atributo o valor correspondente ao somatório das áreas superficiais de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em questão (Burrough & McDonnel, 1998).

A terceira etapa é a definição da rede de drenagem em formato raster. Nesta etapa é gerado um plano de informações (PI) raster em que são marcados apenas os pixels que fazem parte da rede de drenagem. Este PI é obtido através de uma operação de reclassificação sobre o PI resultante da etapa anterior. Neste caso, é necessário definir qual é o limite de área de drenagem a partir do qual um pixel pertence à rede de drenagem (Burrough & McDonnel, 1998). Esta escolha vai depender da qualidade do MDE disponível, das características físicas da bacia e da escala em que se pretende representar os mapas resultantes. Quanto menor o valor limite adotado, maior é a densidade da rede de drenagem e maior o número de trechos de rio resultante.

A quarta etapa da discretização do ArcHydro é a identificação de trechos individuais da rede de dre-

nagem. Nesta etapa são encontrados todos os pontos de início da rede de drenagem e todas as confluências presentes na rede. Os trechos individuais da rede de drenagem são aqueles que unem duas confluências ou um trecho que parte do início da drenagem e chega até a primeira confluência subsequente. Todos os pixels de um mesmo trecho recebem o mesmo código identificador.

A quinta etapa é a definição das mini-bacias (*catchments*), que é realizada através da identificação de todas as células que drenam para cada um dos trechos definidos na etapa anterior. Nesta etapa é criado um PI raster em que cada pixel tem o mesmo código do trecho de rio para o qual drena. No ArcHydro existem três níveis de divisão de uma bacia hidrográfica, para os quais são utilizadas as palavras em inglês *Basin*, *Watershed* e *Catchment*. Aqui se propõe a utilização das palavras Bacia, Sub-Bacia e Mini-bacia, respectivamente, como substitutas ou como tradução das palavras utilizadas no contexto do ArcHydro.

A sexta etapa é a transformação do PI raster de mini-bacias em um PI vetorial, contendo os polígonos do contorno das mini-bacias.

A sétima etapa é a criação do PI vetorial de linhas da rede de drenagem, com os trechos individualizados, que corresponde ao PI raster resultante da quarta etapa. Na sétima etapa também é atribuído um código identificador (HydroID) para cada trecho de rio. Além disso, para cada trecho de rio é identificado o código do trecho localizado a jusante (NextDownID), que é um dos atributos mais importantes para o sistema de suporte à decisão, porque permite identificar a influência que a extração de água num trecho determinado tem a jusante dele como também permite propagar ao longo da rede a quantidade de vazão subtraída nesse e em outros trechos localizados a montante dele.

### O sistema de suporte à decisão de outorga

O sistema de suporte à decisão para outorga descrito aqui foi desenvolvido com base no trabalho original de Collischonn & Lopes (2008), entretanto adaptado a um ambiente SIG gerado a partir do ArcHydro, conforme descrito em Kayser (2009) e Pereira et al. (2009).

Denominado SAD-IPH, o sistema foi desenvolvido dentro do próprio SIG, mais precisamente dentro do software ArcGIS, através das opções de customização disponíveis no software em linguagem *Visual Basic for Applications (VBA)*. O software ArcGIS foi escolhido devido a sua estreita relação com as ferr-

mentas ArcHydro e por ser um programa que inclui diversas opções de personalização ou customização de aplicações através de uma linguagem de programação relativamente simples como é a do VBA.

Basicamente, as rotinas do SAD-IPH estão baseadas na leitura e inserção de dados correspondentes aos atributos do arquivo vetorial de rede de drenagem obtida na discretização da bacia usando ArcHydro. Além disso, também são utilizados arquivos vetoriais no formato de pontos, representando os usuários de água da bacia.

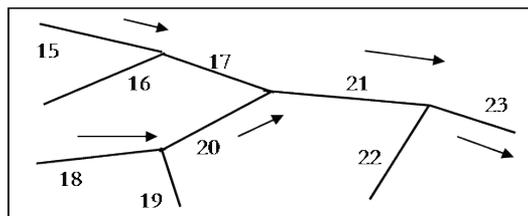
O SAD-IPH está constituído, até o momento, de ferramentas de configuração de layers ou planos de informação, inserção dos dados de disponibilidade hídrica, inserção e edição de usuários e visualização dos resultados. Os dados da disponibilidade são obtidos da aplicação do modelo chuva-vazão MGB-IPH, que será descrito posteriormente.

Ao selecionar um determinado trecho da rede de drenagem de onde se deseje realizar alguma extração de água, o sistema fará a busca da disponibilidade hídrica no trecho, de modo que o usuário possa ter esta informação no momento do pedido de outorga. Através de uma interface, são solicitadas algumas informações cadastrais que são posteriormente armazenadas nos atributos do arquivo vetorial de pontos. Também é solicitada a demanda requerida naquele local, que é armazenada no arquivo da rede de drenagem. Este valor de demanda é armazenado no próprio trecho onde o usuário se localiza e também nos demais trechos a jusante dele.

Para cada trecho de rio e para cada mês do ano é realizada uma comparação entre a vazão disponível e a vazão total de demanda dos usos locais e de montante. Os usos locais são usuários que retiram água diretamente do trecho de rio considerado. Os usos de montante são todos os usuários que retiram água de trechos de rio localizados a montante do trecho considerado.

Em termos de banco de dados, isto significa que cada trecho de rio tem campos de registro que contêm o valor da disponibilidade de água local mês a mês no trecho e outros campos que contêm o registro da vazão total demandada também mês a mês no próprio trecho e a montante dele. Um determinado uso pode receber outorga ou não dependendo da relação entre disponibilidade e demanda em todos os trechos de rio em que foi discretizada a rede hidrográfica da bacia.

Nas Figuras 1 e 2 e Tabelas 1 e 2 se exemplifica em forma esquemática a base do funcionamento do SAD-IPH melhormente descrito nos parágrafos seguintes.



**FIGURA 1.** Representação de uma rede de drenagem fictícia com trechos codificados de 15 a 23 sem usuários inseridos.

A Figura 1 representa esquematicamente uma rede de drenagem fictícia simples, mostrando os respectivos códigos associados a cada trecho e também o sentido do escoamento na bacia.

Na Tabela 1 se tem uma representação do que seria a tabela de atributos desta rede fictícia. Observar o código identificador de cada trecho (HydroID) e o código identificador do trecho de jusante (Next-DownID), originados na etapa de discretização com o ArcHydro. As outras colunas armazenam os valores de demanda local do trecho, demanda acumulada nos trechos localizados a montante dele mais as demandas dele inclusive e o fator de comprometimento de cada trecho, todos eles explicados seguidamente no exemplo.

**TABELA 1**  
Representação da tabela de atributos da rede de drenagem fictícia sem usuários inseridos

HydroID	Next Down ID	Disponibilidade	Demanda Local	Demanda Acum.	Fator Comp.
15	17	disp <sub>15</sub>	0	0	0
16	17	disp <sub>16</sub>	0	0	0
17	21	disp <sub>17</sub>	0	0	0
18	20	disp <sub>18</sub>	0	0	0
19	20	disp <sub>19</sub>	0	0	0
20	21	disp <sub>20</sub>	0	0	0
21	23	disp <sub>21</sub>	0	0	0
22	23	disp <sub>22</sub>	0	0	0
23	-1	disp <sub>23</sub>	0	0	0

Observe-se que o trecho 23 não possui trechos a jusante dele, motivo pelo qual a coluna de NextDownID tem valor -1. Os dados de disponibilidade na

tabela representados pelos valores  $disp_i$ , são obtidos através da integração com o modelo MGB-IPH e, como é possível notar, os campos de demanda local, demanda acumulada e fator de comprometimento estão zerados antes de serem inseridos os usuários. Estes campos serão preenchidos na medida em que os usuários vão sendo inseridos na rede. O fator de comprometimento ( $F_c$ ) é uma relação entre demanda e disponibilidade que será explicitada em seguida.

A Figura 2 mostra uma modificação na rede de drenagem, na qual a mesma recebe a inserção de dois usuários de água representados por bolas pretas nos trechos de códigos 16 e 20.

Observando a Tabela 2, podem-se notar as modificações ocorridas como consequência da inserção dos usuários. Na coluna demanda local encontram-se os valores de demanda dos usuários localizados no trecho 16 e no trecho 20.

A coluna de demanda acumulada representa o somatório da vazão demandada no trecho e em todos os trechos localizados a montante dele.

A seguir, encontra-se o cálculo das demandas acumuladas  $demc_i$  para um mês específico qualquer nos trechos 16, 17 e 20. Aqui é importante apontar que os valores que representam a disponibilidade hídrica em cada trecho são os valores de vazão com 90% de permanência no tempo para cada um dos trechos e para cada mês do ano calculados através do modelo MGB-IPH.

As demandas acumuladas nos trechos 16 e 20 são iguais às demandas locais, pois estes trechos não possuem nenhuma outra demanda a montante.

$$demc_{16} = deml_{16}$$

$$demc_{17} = deml_{16}$$

$$demc_{20} = deml_{20}$$

Já as demandas acumuladas nos trechos 21 e 23 representam a soma das demandas locais, pois os usuários estão localizados a montante destes trechos.

$$demc_{21} = deml_{16} + deml_{20}$$

$$demc_{23} = deml_{16} + deml_{20}$$

A coluna do fator de comprometimento ( $F_c$ ) é uma relação entre as demandas acumuladas e a disponibilidade de cada trecho. Para um dado trecho  $i$ , ela é dada segundo a seguinte equação:

$$F_{c_i} = \frac{demc_i}{disp_i}$$

De acordo com o valor do fator de comprometimento, cada trecho da rede recebe uma classificação quanto ao grau de demanda de água. Determinado trecho pode ter um comprometimento nulo, baixo,

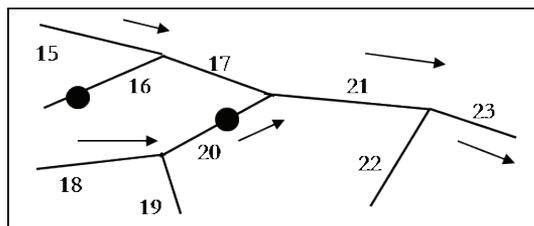


Figura 2 – Representação de uma rede de drenagem fictícia com trechos codificados de 15 a 23 com a inserção de dois usuários (bolas pretas) nos trechos 16 e 20.

TABELA 2  
Representação da tabela de atributos da rede de drenagem fictícia após a inserção dos usuários.

Hydro ID	Next Down ID	Disponibilidade	Demanda Local	Demanda Acum.	Fator Comp.
15	17	disp15	0	0	0
16	17	disp16	deml16	demc16	Fc16
17	21	disp17	0	demc17	Fc17
18	20	disp18	0	0	0
19	20	disp19	0	0	0
20	21	disp20	deml20	demc20	Fc20
21	23	disp21	0	demc21	Fc21
22	23	disp22	0	0	0
23	-1	disp23	0	demc23	Fc23

médio, alto ou crítico, de acordo com o valor de  $F_c$ . Comprometimentos críticos representam trechos com valor de  $F_c$  maior a 1, ou seja, quando a demanda é maior que a disponibilidade. Pode-se então atribuir uma escala de cores correspondente a cada uma destas classificações, fazendo com que seja possível visualizar o comprometimento de cada trecho de acordo com a cor associada ao seu  $F_c$ . Neste caso as classes de comprometimento foram fixadas segundo os intervalos de valores seguintes:

$F_c < 22,5\%$	Comprometimento muito baixo
$22,5\% < F_c < 45\%$	Comprometimento baixo
$45\% < F_c < 67,5\%$	Comprometimento medio
$67,5\% < F_c < 90\%$	Comprometimento elevado
$F_c > 90\%$	Comprometimento crítico.

### Estimativa de disponibilidade hídrica usando modelagem hidrológica

Neste trabalho, os dados de disponibilidade hídrica foram obtidos por meio de modelagem hidrológica, especificamente com o uso do MGB-IPH, amplamente descrito em Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007).

Este modelo já foi aplicado com sucesso em varias regiões do Brasil. No estado de Rio Grande do Sul, aplicações foram feitas nas bacias do rio Uruguai e do rio Taquari-Antas (Collischonn, 2001), rio Quaraí (Collischonn et al., 2010) e rio Caí (Estado de Rio Grande do Sul, 2007).

Como já foi comentado, uma boa integração entre a fonte de dados de disponibilidade hídrica, no caso, o modelo MGB-IPH e o sistema de apoio à decisão, o SAD-IPH, dentro do SIG, depende da codificação resultante da discretização da bacia em mini-bacias ou a rede de drenagem da bacia discretizada em trechos de número igual ao de mini-bacias. Isto significa que os trechos de rio associados a cada mini-bacia dentro da modelagem no MGB-IPH assim como os trechos da rede de drenagem no SAD-IPH devem coincidir exatamente em número, posicionamento e obviamente em codificação. Para atingir este objetivo, é preciso utilizar como base da calibração do modelo a mesma discretização em mini-bacias produto das etapas resumidas em parágrafos anteriores e detalhadas em Mainardi et al. (2009).

Além do pré-processamento feito a partir de MDE da região de estudo, para a aplicação do MGB-IPH, são necessários dados que representem suficien-

temente a bacia, temporal e espacialmente. Estes dados são: séries temporais de chuva e vazão, séries de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento, mapas de uso da terra e cobertura vegetal, tipos de solo, modelo digital de elevação e cartas topográficas.

A calibração pode ser feita através das considerações físicas ou através da otimização matemática, em ambos os casos os parâmetros são estimados buscando a melhor concordância possível entre os dados observados e os resultados do modelo.

O modelo, que calcula balanço de água no solo pelo método simplificado, evapotranspiração por Penman–Monteith e propagação da vazão ao longo dos trechos de rio pelo método de Muskingun Cunge, tem como parâmetros:

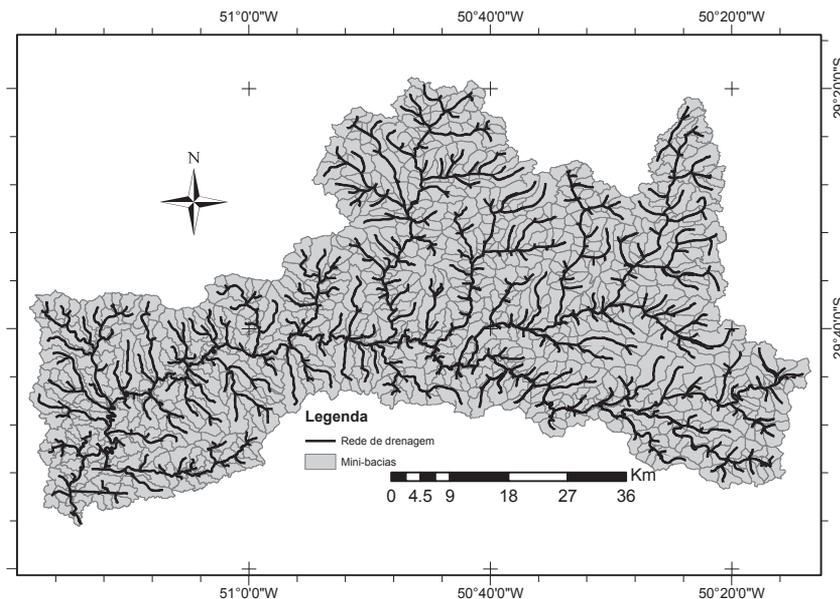
- $W_m$ : capacidade de armazenamento do solo [mm]
- $b$ : parâmetro de forma da relação entre armazenamento e saturação [ - ]
- $K_{INT}$ : parâmetro de drenagem sub-superficial. [mm.dia<sup>-1</sup>]
- $K_{BAS}$ : parâmetro de escoamento subterrâneo. [mm.dia<sup>-1</sup>]
- $C_S$ : parâmetro para calibração da propagação superficial nas células [-]
- $C_I$ : parâmetro para calibração da propagação sub-superficial nas células [-]
- $C_{BAS}$ : parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo. [dias]

Os parâmetros fixos que têm valores mensuráveis, que podem ser relacionados à vegetação, ou que não interferem profundamente nos resultados são: IAF índice de área foliar,  $r_s$  resistência superficial [s.m<sup>-1</sup>],  $\alpha$  albedo [-],  $e$ ,  $W_z$  limite inferior de armazenamento no solo para haver escoamento sub-superficial.

Os valores de todos estes parâmetros variam espacialmente dentro da bacia de acordo com cada unidade de resposta hidrológica, chamados no MGB-IPH de blocos, que são produto da combinação de informações do tipo e uso do solo em cada unidade espacial.

Como o presente trabalho pretende demonstrar a praticidade da integração de modelagem e SIG para suporte à tomada de decisão relacionada à outorga entende-se que um dos objetivos da aplicação do MGB-IPH aqui é representar o melhor possível as vazões mínimas que por sua vez serão utilizadas para avaliar situações críticas em locais onde a oferta de





**Figura 4 – Discretização da bacia do rio dos Sinos.**

Dentro da etapa de cálculo da disponibilidade hídrica através do modelo MGB-IPH, foram utilizados dados de precipitação diária em 83 estações pluviométricas distribuídas dentro e ao redor da bacia, dados diários de vazão de 5 estações fluviométricas localizadas dentro da bacia, dados das médias mensais de temperatura, pressão, insolação, umidade relativa do ar e velocidade do vento em 2 estações climáticas da bacia. Todos estes dados se encontram disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas (HidroWeb) da ANA. Também foi feita uma classificação de uso do solo a partir de imagens LANDSAT TM5 disponíveis na página da Divisão de geração de Imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tendo como resultado 4 classes de uso do solo predominantes como mostra a Tabela 3.

4 são apresentados os 6 tipos de unidade de resposta hidrológica ou blocos resultantes da combinação dos 4 usos de solo predominantes e 2 tipos de solo característicos na bacia. É importante explicar que para efeitos de simplificação e porque existem solos de características similares neste caso específico, a classificação em tipos de solo dentro da bacia do rio dos Sinos foi reduzida para duas classes da forma seguinte: os tipos Planossolos, Podzolicos e Terras Roxas Estruturadas foram reclassificados como Solos Profundos e os tipos Cambissolo e Litólicos reclassificados como Solos Rasos. São apresentados nas Tabelas 5 e 6 os valores atribuídos para cada um dos parâmetros calibráveis associados e de propagação nas células respectivamente.

**TABELA 3**  
**Classes de uso do solo e cobertura vegetal na bacia do rio dos Sinos**

Classe	Frequência
Água	0,10%
Zona Urbana	6,28%
Floresta	45,77%
Agricultura/Pastagem	47,85%

Seguindo o processo de cálculo da disponibilidade hídrica dentro da bacia do rio dos Sinos, na Tabela

**TABELA 4**  
**Caracterização dos blocos do modelo na bacia do rio dos Sinos**

Bloco	Uso/Tipo de Solo
1	Área urbana
2	Floresta/Solo Raso
3	Floresta/Solo Profundo
4	Agric.-Pastagem/S. Profundo
5	Agric.-Pastagem/S. Raso
6	Água

TABELA 5  
Valores calibrados dos parâmetros associados aos blocos

Parâmetros	Blocos					
	1	2	3	4	5	6
Wm(mm)	96,4	158,8	343,5	216,8	236,1	0,0
b(-)	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,1
$K_{INT}$ (mm.dia <sup>-1</sup> )	26,82	26,82	26,82	26,82	26,82	10
$K_{BAS}$ (mm.dia <sup>-1</sup> )	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,2
XL(-)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

TABELA 6  
Valores calibrados dos parâmetros de propagação nas células

Sub-bacias	$C_S$ (-)	$C_I$ (-)	$C_B$ (dias)
Todas	18,6	380,9	48

Na Tabela 7 são apresentados os valores das funções objetivo para a estação localizada na cidade de Campo Bom.

TABELA 7  
Valores das funções objetivo no posto de Campo Bom no período de calibração (1979 a 2006).

Local	$\Delta Q_{90}$ m <sup>3</sup> /s	1-Nash Sutcliffe	$\Delta V$ (%)
Rio dos Sinos/ Campo Bom	0,029	0,286	3,812

Nas Figuras 5 e 6 são mostrados os hidrogramas calculado e observado e a curva de permanência para a estação em Campo Bom.

Foram computados os valores de demanda hídrica por captação direta de água dentro da bacia através da inserção de dados de usuários reais de abastecimento público, setor industrial, usuários de irrigação e de piscicultura.

A lista de usuários e os dados de captação foram fornecidos pelo Departamento de Recursos Hídricos (DRH) da Secretaria do Meio Ambiente (SEMA) do estado de Rio Grande do Sul e contem usuários até o ano 2008. Estes são dados de captação direta do rio em m<sup>3</sup>/s com os seus respectivos regimes de captação (Rio Grande do Sul, 2008).

Na Figura 7 é apresentada a variabilidade espacial do fator de comprometimento e da disponibilidade

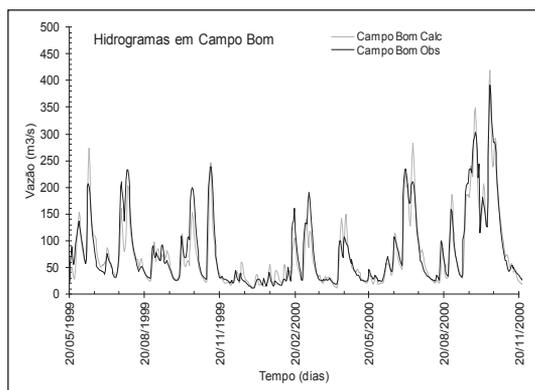


Figura 5 – Hidrogramas observado e calculado em Campo Bom.

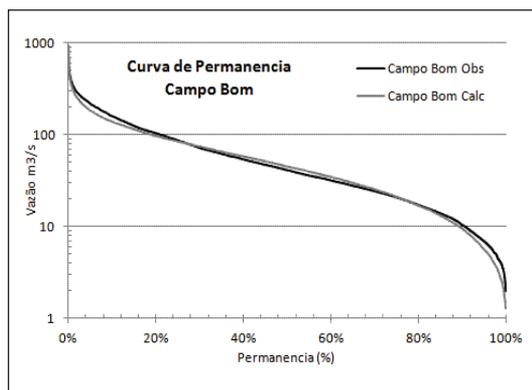


Figura 6 – Curva de permanência observada e calculada em Campo Bom.

hídrica na bacia do rio dos Sinos para o mês de janeiro. Observa-se que os trechos mais comprometidos da região leste da bacia, são os localizados entre os municípios de Carará e Taquara, e os trechos mais comprometidos na porção final da bacia se localizam entre os municípios de Sapucaia do Sul e Canoas. Ambas as regiões verificam uso extensivo do recurso para irrigação do cultivo de arroz.

Nas Figuras 8 e 9 se mostram em detalhe esses trechos críticos. É importante mencionar que nos trechos finais do rio, os localizados mais a jusante da bacia, existe o efeito de remanso provocado pelo rio Jacuí, simulado em Rosauro (1979) e em Garcia (1997), portanto a situação real nos trechos próximos ao exutório poderia ter certa discrepância com relação ao que é aqui mostrado.

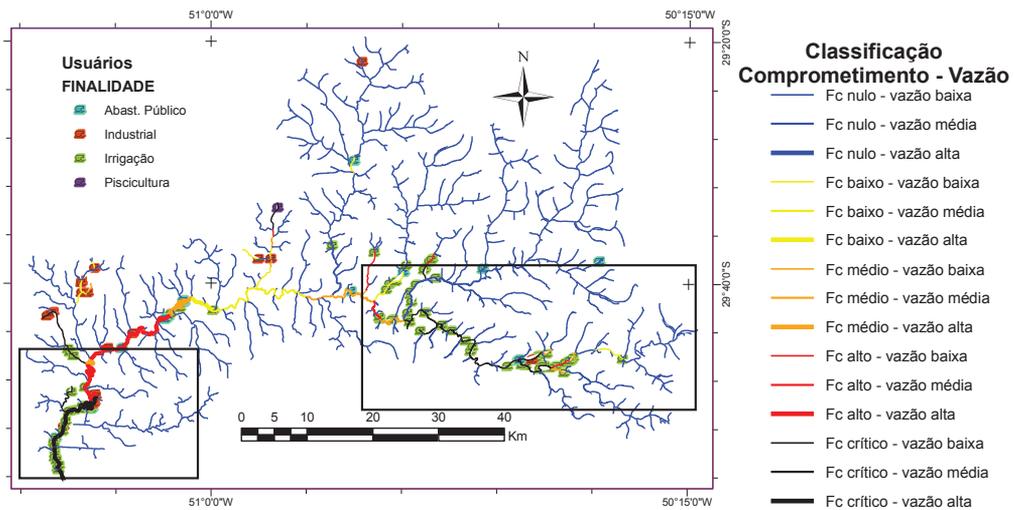


Figura 7 - Variabilidade espacial do fator de comprometimento e da disponibilidade hídrica na Bacia do Rio dos Sinos para o mês de janeiro, com destaque para as áreas mais comprometidas.

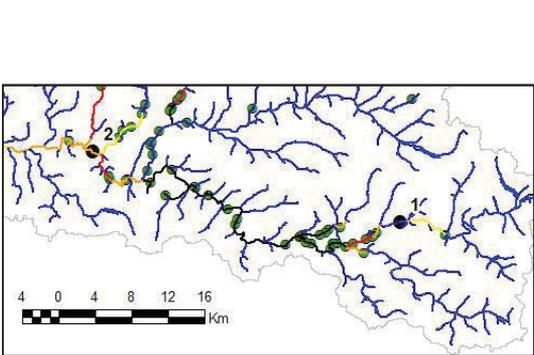


Figura 8 – Detalhamento da área comprometida na região leste da bacia.

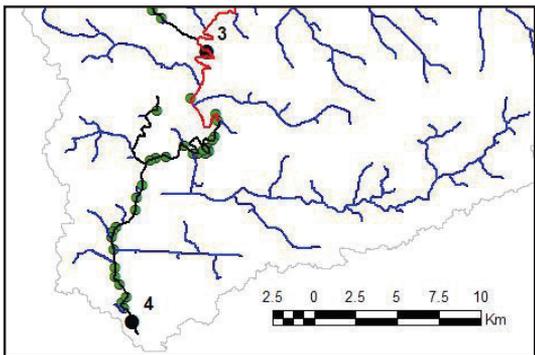


Figura 9 – Detalhamento da área comprometida na porção final da bacia.

## CONCLUSÕES

A análise de disponibilidade de água para outorga de direito de uso é, em geral, um procedimento relativamente repetitivo, e, por este motivo, deveria permitir a aplicação de métodos automáticos. Modelos hidrológicos podem-se constituir em uma boa alternativa para o cálculo da disponibilidade hídrica desde que se disponham dos dados necessários e técnicos capacitados para a aplicação e interpretação dos mesmos.

Entretanto, ainda as análises de disponibilidade hídrica são realizadas através de procedimentos manuais como utilização de mapas impressos, planilhas de cálculo e outros dados em forma isolada e não integrada tornando essas análises demoradas e mais expostas a erros.

Neste trabalho foi apresentada uma forma de facilitar a análise de pedidos de outorga de direito de uso da água através de uma metodologia que integra SIG e modelagem hidrológica.

Os resultados no estudo de caso da bacia do rio dos Sinos mostraram que é possível aprimorar a metodologia de análise de outorga ao integrar SIG

e modelagem hidrológica e mostraram também que é possível identificar facilmente a relação entre as demandas e disponibilidades nos diferentes trechos do curso d'água, avaliando espacialmente o fator de comprometimento de cada trecho e facilitando ao agente outorgante a tomada de decisão quanto às solicitações de outorga na bacia.

Pretende-se estender a metodologia descrita neste artigo para contemplar também a tomada de decisão relativa ao lançamento de efluentes, como proposto em outros sistemas de suporte à decisão (Nahon et al., 2009).

Seria possível ainda integrar as retiradas de água subterrânea na metodologia apresentada. Uma possibilidade neste sentido foi sugerida por Silva (2007), que analisou o impacto das retiradas de água subterrânea sobre a disponibilidade de água superficial em escala regional.

## AGRADECIMENTOS

Os dois primeiros autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelas bolsas de pesquisa concedidas.

## Referências

- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.R.; WILLIAMS, J.R., 1998. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34 (1), 73–89.
- BUARQUE, D. C.; FAN, F.M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. 2009. Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação. *RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos* Volume 14 n.2 Abr/Jun 2009, 91-103.
- BURROUGH, P. A.; MCDONNEL, R. A. 1998 *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford.
- COLLISCHONN, B; LOPES, A. V. Sistema de Controle de Balanço Hídrico para apoio à outorga na bacia do São Francisco. *Anais do I Encontro Nacional de Hidroinformática*. Fortaleza – CE. 2008.
- COLLISCHONN, B; LOPES, A. V. Sistema de Apoio à Decisão para análise de outorga na bacia do rio Paraná. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. *Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Campo Grande : ABRH, 2009.
- COLLISCHONN, B.; CAUDURO R.; COLLISCHONN, W.; MEIRELLES, F.; SCHETINI, E.; MAINARDI, F. 2010. Modelagem hidrológica de uma bacia com uso intensivo de água: caso do rio Quaraí-RS. Submetido à *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*.
- COLLISCHONN, W. 2001. Simulação Hidrológica de Grandes Bacias. Tese de doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 182p.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; TUCCI, C.E.M. 2007. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 52, 878-895 pp.
- COLLISCHONN, W. Manual de Discretização de Bacias para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2009.
- CONSEMA. 2006. Ata da Nonagésima Reunião Ordinária Do Conselho Estadual Do Meio Ambiente – CONSEMA. Disponível em: [www.sema.rs.gov.br/sema/dados/1071210138.doc](http://www.sema.rs.gov.br/sema/dados/1071210138.doc). Acesso em: maio 2010.
- GARCIA, R.L. 1997. Simulação da Qualidade da Água em Regime não-Permanente no Rio dos Sinos, RS. *Disertação de Mestrado*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 124p.
- GETIRANA, A. C. V. 2009. Contribuições da altimetria espacial à modelagem hidrológica de grandes bacias na Amazônia. Tese de Doutorado. UFRJ, COPPE.

- KAYSER R. H. B. Descrição do Sistema Suporte à Decisão interligado a SIG para Gerenciamento de Bacias Hidrográficas. Projeto de Iniciação Científica. Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. Porto Alegre. 2009.
- MAIDMENT D. R. *ArchHydro: GIS for Water Resources*. Redlands, CA, ESRI Press. 2002.
- MAINARDI, F. F.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; CAUDURO, R.; KAYSER, R. *Manual ArchHydro para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 1.2*. Projeto Integrado de Cooperação Amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2009.
- MAINARDI, F. F.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; CAUDURO, R.; KAYSER, R. *Manual do Prepro-MGB para aplicação do modelo MGB-IPH. Versão 4.1*. Projeto integrado de cooperação amazônica e de Modernização do Monitoramento Hidrológico. 2010.
- NAHON, I. M.; KISHI, R. T.; FERNANDES, C. V. S. 2009 *Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes - Estudo de Caso: Bacia do Alto Iguçu*. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 14 n.2 Abr/Jun 2009, 47-58.
- PAIVA R. C. 2009. *Modelagem Hidrológica e Hidrodinâmica de Grandes Bacias. Estudo de caso: bacia do rio Solimões*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 168p.
- PEREIRA, M. M. P.; KAYSER, R. H. B.; FRAGOSO JR., C. R.; COLLISCHONN, W. . *Protótipo de Sistema de Suporte à Decisão para gerenciamento de bacias hidrográficas integrado a um SIG: IPH-SISDEC*. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande : ABRH, 2009.
- PETERS, J., CHARLEY, W., PABST, A. 1995. *The hydrologic modeling system (HEC-HMS): Design and development issues*. Tech. Paper No. 149, Hydrologic Engrg. Ctr., U.S. Army Corps of Engineers, Davis, Calif.
- PORTO, R.; LANNA, A. E.; BRAGA, B. P.; CIRILO, J. A.; ZAHED, K.; AZEVEDO, L. G. T.; CALVO, L.; DE BARROS, M. T. L.; BARBOSA, P. S. F. *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRH, 420 p. 1997.
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Departamento de Recursos Hídricos. *Primeira etapa do plano de bacia do rio Cai: Consolidação do conhecimento sobre recursos hídricos e enquadramento dos recursos hídricos superficiais*. Relatório Temático A.2 Diagnostico da Disponibilidade Hídrica. Porto Alegre. 2007. 204p
- RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Portal do meio ambiente RS. *Bacia Hidrográfica do rio dos Sinos*. 2010. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br>>. Acesso em: maio 2012
- RIO GRANDE DO SUL. Diego Polacchini Carrillo. DRH/SEMA. *Disponibilidades e demandas da bacia do rio dos Sinos*. Porto Alegre, 2008.
- RODRIGUES, R. B. SSD RB – *Sistema de Suporte à Decisão Proposto para a Gestão Quali-Quantitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo Uso da Água*. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. São Paulo, 2005. 155p.
- ROSAURO, N. M. L. 1979. *Modelo Hidrodinâmico para rios e Redes de Canais Naturais*. Disertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 150p.
- SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C.; DE ALBUQUERQUE, D.; PAIVA, A. E. *Aplicação do Modelo Hidrológico Distribuído Açumod à bacia hidrográfica do rio do Peixe – Estado da Paraíba*. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 5 n.3 Jul/Set 2000, 5-19.
- SUI, D.Z.; MAGGIO R.C.; *Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects*. Computers, Environment and Urban Systems 23: 33 – 51. 1999.
- SILVA, F. C. 2007. *Análise integrada de usos de água superficial e subterrânea em macro-escala numa bacia hidrográfica: o caso do alto rio Paranaíba*. Dissertação de mestrado. UFRGS. IPH. 153p
- SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. 2000 *Gestão de Recursos Hídricos: Aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais*. ABRH, Brasília.
- VERDIN, K. L.; VERDIN, J. P. *A topological system for delineation and codification of the Earth's river basins*. Journal of Hydrology 218: 1–12. 1999
- WHITEAKER, T. L.; MAIDMENT, D. R.; GOODALL, J. L.; TAKAMATSU, M. *Integrating ArchHydro Features with a schematic Network*. Transactions in GIS, 2006, 10(2): 219–237.

**Margarita Pereira** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. [mmepereira@gmail.com](mailto:mmepereira@gmail.com).

**Rafael Bloedow Kayser** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. [rafaelkayser@hotmail.com](mailto:rafaelkayser@hotmail.com).

**Walter Collischonn** Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. [collischonn@iph.ufrgs.br](mailto:collischonn@iph.ufrgs.br).