

## Análise de Sensibilidade do Modelo MGB-IPH a Mudanças de uso da Terra

Débora Missio Bayer\* ; Walter Collischonn\*

deborabayer@gmail.com; collischonn@ufrgs.br

Recebido: 18/09/12 - revisado: 10/10/12 - aceito: 06/05/13

---

### RESUMO

Os efeitos das alterações de uso da terra na hidrologia das bacias hidrográficas tem sido, ao longo dos anos, amplamente discutidos para pequenas bacias experimentais. O uso de modelos hidrológicos para descrever esse tipo de processo tem se tornado promissor no que tange o estudo de grandes bacias. No entanto, os modelos devem ser capazes de captar as alterações que as mudanças de uso provocam na bacia. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi verificar a sensibilidade do modelo distribuído para grandes bacias MGB-IPH a mudanças de uso da terra, em termos de vazões médias de longo termo, e comparar seu desempenho aos resultados experimentais disponíveis na literatura. As simulações mostraram que o MGB-IPH reproduz, de forma coerente, o comportamento médio das bacias submetidas ao desmatamento em um grande número de estudos experimentais.

**Palavras-chave:** Modelos hidrológicos. Grandes bacias. Alterações de vazão. Desmatamento.

---

### INTRODUÇÃO

Uma das questões mais antigas em hidrologia é a estimativa dos impactos hidrológicos da alteração do tipo de vegetação que cobre os solos. Esta questão tem sido tema de debate há séculos e, apenas nos últimos cem anos, começou a ser respondida de uma forma mais objetiva.

O debate inicial, basicamente especulativo, foi sendo substituído, no início do século XX, por estudos experimentais (ANDREÁSSIAN et al., 2004). Com o passar do tempo, foi consolidada a técnica de avaliação de impactos da vegetação sobre o escoamento baseada em experimentos com bacias pareadas. Estes estudos foram repetidos em um grande número de bacias, em diferentes regiões do mundo, e hoje permitem responder razoavelmente bem às principais perguntas sobre o impacto do desmatamento ou reflorestamento em uma bacia.

Os estudos em bacias pareadas mostram que reduções de áreas florestadas produzem incrementos na vazão, embora as magnitudes desses incrementos possam ser distintas (BOSCH; HEWLETT, 1982; BRUIJNZEEL, 1990). No entanto, a maioria desses resultados está baseada em estudos de Pequenas

nas bacias experimentais, cerca de 1 km<sup>2</sup>. Grandes bacias, com mais de 10 mil km<sup>2</sup>, tendem a apresentar um mosaico de diferentes usos e práticas, com heterogeneidades na geologia, na topografia e no solo (WILK; ANDERSSON; PLERMKAMON, 2001).

Para analisar o impacto da mudança da vegetação em bacias maiores, onde, em geral, a mudança do uso da terra não ocorre em toda a área da bacia, normalmente são utilizados os modelos hidrológicos de base física. Atualmente existem vários modelos hidrológicos disponíveis, aos quais se atribui a capacidade de representar impactos de mudanças de uso da terra e vegetação (COE, 2000; COLLISCHONN et al., 2007; ECKHARDT et al., 2002; KUCHARIK et al., 2000; NEITSCH et al., 2011; RAGAB; BROMLEY, 2010).

Uma das primeiras etapas no uso de um modelo hidrológico para avaliação de impactos de mudanças de vegetação deveria ser uma análise da sensibilidade do modelo aos parâmetros relacionados à vegetação (CARAM, 2010; COLLISCHONN, 2001), e uma avaliação da capacidade deste modelo de representar os impactos em uma ou mais bacias experimentais, ou que passaram por um processo histórico de desmatamento (RODRIGUEZ, 2011). Idealmente, deveriam ser conduzidos testes do tipo 2a e 2b identificados por Klemes (1986), em que o modelo seria calibrado, na condição pré-alteração do uso da terra, e verificado na condição pós-alteração do uso da terra. Entretanto, nem sempre é possível realizar este tipo de teste, principalmente

---

\*Instituto de Pesquisas Hidráulicas, UFRGS

porque os dados necessários raramente estão disponíveis.

Um teste mais geral que pode ser proposto é comparar os resultados do impacto do desmatamento obtidos pelo modelo hidrológico em uma bacia particular a um grande número de resultados experimentais, obtidos em diversas outras bacias. O objetivo, neste caso, é avaliar se os resultados do modelo são coerentes com a média dos resultados experimentais, em termos qualitativos e quantitativos.

No presente trabalho é apresentada uma análise da sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso e de cobertura da terra e uma validação da capacidade de representação de impactos do desmatamento ou reflorestamento sobre a vazão média de longo termo de bacias hidrográficas no modelo MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007; COLLISCHONN; TUCCI, 2001). A validação é realizada simulando o impacto do desmatamento em bacias com diferentes condições climáticas do Brasil e comparando os resultados do modelo com resultados experimentais de um grande número de bacias experimentais reunidos por Bosch e Hewlett (1982) e por Trimble, Weirich e Hoag (1987).

## **AVALIAÇÕES EXPERIMENTAIS DE IMPACTOS DE MUDANÇAS DE USO DA TERRA**

As avaliações experimentais dos impactos das mudanças de uso e de cobertura da terra sobre a resposta hidrológica de bacias hidrográficas começaram a ter resultados razoavelmente confiáveis e generalizáveis a partir da criação da técnica de bacias pareadas (*paired-watershed experiments*) (ANDREÁSSIAN, 2004). Nesta técnica, duas bacias adjacentes com características físicas semelhantes e mesma vegetação são monitoradas por um determinado período, chamado de calibração ou pré-tratamento, que permite a obtenção de equações de regressão linear entre as duas bacias. Após isso, em uma das bacias é aplicado o tratamento, ou seja, ocorre uma alteração no uso da terra, em toda ou em parte da bacia, seguido por um novo período de monitoramento, para verificar se houve ou não alguma alteração relacionada ao tratamento aplicado. Essa avaliação é realizada por diferenças entre a vazão observada e a prevista pela regressão linear. Nas fases de monitoramento são medidas as principais variáveis do ciclo hidrológico: precipitação, escoamento e, se possível, evapotranspiração e armazenamento de água no solo.

Os experimentos em bacias pareadas tem a vantagem de diminuir os efeitos da variabilidade climática, já que uma das bacias permanece com a cobertura vegetal original. Quando as duas bacias são suficientemente semelhantes, os efeitos da variabilidade espacial das características do solo, litologia e relevo também são desprezíveis (ANDREÁSSIAN, 2004).

Este tipo de experimento foi aplicado pela primeira vez por Bates e Henry (1928) no Estado do Colorado, nos EUA (MCCULLOCH; ROBINSON, 1993). A partir daí, na década de 1930, com a implantação de estudos em bacias hidrográficas em locais como a Floresta Experimental San Dimas (*San Dimas Experimental Forest*) na Califórnia, EUA (DUNN et al., 1988) e pelo Laboratório Hidrológico de Coweeta (*Coweeta Hydrologic Laboratory*) na Carolina do Norte, EUA (HOOVER, 1944; SWANK; CROSSLEY, 1988) ocorreu uma expansão das pesquisas relacionadas aos impactos da mudança da vegetação em bacias hidrográficas. Estas pesquisas foram posteriormente estendidas a outros países e a bacias com outras características físicas.

Ao longo das décadas seguintes, o vasto número de estudos abrangendo este tipo de aplicação levou Hibbert (1967) a reunir 39 estudos de casos em bacias hidrográficas, com áreas entre 0,02 e 2.000 km<sup>2</sup>, e discuti-los de modo coletivo. O referido autor generalizou os resultados identificando o seguinte: (i) reduções na área da bacia coberta por florestas aumentam a produção de água; (ii) substituir uma área de vegetação escassa por uma cobertura florestal provoca uma diminuição na produção de água na bacia; (iii) as respostas ao tratamento são altamente variáveis e, na maioria, imprevisíveis.

Essas conclusões foram reafirmadas por Bosch e Hewlett (1982), que incorporaram 55 novas bacias experimentais, com áreas entre 0,01 e 2.000 km<sup>2</sup>, às bacias anteriormente apresentadas por Hibbert (1967). Bosch e Hewlett (1982) sintetizaram os resultados na forma de tabelas e gráficos, em que são apresentadas relações entre porcentagem da área desmatada na bacia e incrementos no escoamento anual médio, obtidas a partir da análise de vários experimentos com bacias pareadas em todo o mundo (ver Figura 1). No entanto, Bosch e Hewlett (1982) não consideraram resultados de estudos em que a fração da área alterada foi inferior a 20% da bacia. Para os autores mencionados, as alterações na vegetação da bacia que afetam menos do que 20% da área de drenagem são difíceis de serem percebidas com medições de vazão por métodos hidrométricos, devido às incertezas nas próprias medições.

Posteriormente, Trimble, Weirich e Hoag (1987) apresentaram um complemento à revisão de Bosch e Hewlett (1982), incluindo resultados de estudos com fração da bacia com alteração de vegetação variando entre 9 e 28%. Os trabalhos revisados por Trimble, Weirich e Hoag (1987) foram realizados em 10 bacias hidrográficas com áreas entre 2.800 e 19.500 km<sup>2</sup>. A união dos dados originais de Bosch e Hewlett (1982) aos de Trimble, Weirich e Hoag (1987) foi originalmente apresentada por Trimble, Weirich e Hoag (1987) e está reproduzida na figura 1.

A figura 1 apresenta um resumo dos resultados de experimentos em bacias pareadas, e relaciona a porcentagem da área da bacia com vegetação alterada (desmatamento ou reflorestamento), com a alteração da vazão média de longo termo (aumento ou redução). Nesta figura, pode-se observar a grande dispersão nos resultados oriundos de estudos experimentais, mas, sobretudo, um aumento da vazão em consequência do aumento da área desmatada na bacia. Isto fica ainda mais evidente com o ajuste de dados, feito por Trimble, Weirich e Hoag (1987), através de uma análise de regressão, em que obteve um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,5 e um erro padrão de 89 mm.

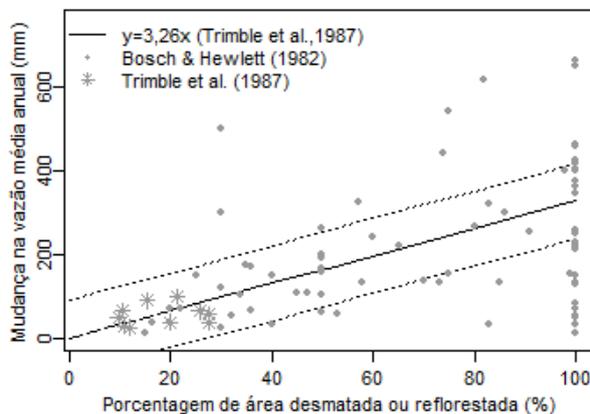


Figura 1 -Mudanças da área florestada versus alterações na produção de água. Os dados correspondem aos resultados de estudos experimentais apresentados por Bosch e Hewlett (1982) (o) e aos resultados de Trimble, Weirich e Hoag (1987) (\*), com o ajuste pela equação de regressão (linha contínua) e o erro padrão de 89 mm (linha tracejada)

A equação de regressão proposta por Trimble, Weirich e Hoag (1987) é  $y = 3,26.x$ , onde  $y$  é o aumento ou redução da vazão média de longo

termo (em mm.ano<sup>-1</sup>) e  $x$  é o percentual da bacia com vegetação alterada. Esta equação permite estimar o aumento de vazão média em uma bacia a partir do conhecimento do percentual de área desmatada. Por exemplo, considerando uma bacia inteiramente coberta por florestas, um desmatamento em 40% da sua área de drenagem terá como consequência um incremento do escoamento anual de, aproximadamente, 130 mm. Entretanto, esta estimativa tem um erro da ordem de 89 mm, segundo Trimble, Weirich e Hoag (1987). Em outras palavras, o erro da estimativa é muito próximo do próprio valor que se deseja estimar.

Além das sínteses em termos quantitativos, apresentadas na figura 1, diversos autores propuseram sínteses em termos qualitativos (ANDREÁSSIAN, 2004; BRUIJNZEEL, 1990; CHANG, 2006; MCCULLOCH; ROBINSON, 1993; ZHANG et al., 2007; ZHAO; XU; ZHANG, 2012). As principais conclusões desses autores são apresentadas a seguir:

- A evapotranspiração das florestas é maior do que a de outros tipos de vegetação, por esse motivo o desmatamento provoca um aumento da vazão média e o reflorestamento uma diminuição (ANDREÁSSIAN, 2004; CHANG, 2006; MCCULLOCH; ROBINSON, 1993; ZHANG et al., 2007);
- O desmatamento pode aumentar tanto o volume das cheias quanto seus picos. No entanto este efeito é mais variável que o efeito sobre as vazões totais. Além disso, o desmatamento ou o reflorestamento não afetam significativamente as cheias de grande tempo de retorno (ANDREÁSSIAN, 2004);
- Florestas podem reduzir pequenas cheias, mas, em geral, não reduzem eventos extremos (MCCULLOCH; ROBINSON, 1993);
- O reflorestamento diminui e o desmatamento aumenta as vazões mínimas (ANDREÁSSIAN, 2004);
- Os maiores impactos sobre o escoamento médio (em mm.ano<sup>-1</sup>) ocorrem em regiões com alta pluviometria, no entanto a maior redução proporcional ocorre em regiões com baixa pluviometria ou em períodos de baixa vazão (ZHANG et al., 2007);
- O número de dias sem ou com baixa vazão aumenta com o reflorestamento (ZHANG et al., 2007).
- Os efeitos do reflorestamento variam ao longo do desenvolvimento das florestas

(ANDREÁSSIAN, 2004; ZHANG et al., 2007);

- O desmatamento de bacias sob clima seco gera pequenos aumentos percentuais nas vazões altas e grandes aumentos percentuais nas vazões baixas (ZHAO; XU; ZHANG, 2012);
- O reflorestamento de bacias sob clima úmido resulta em reduções percentuais pequenas e constantes em todos os percentis de vazão (ZHAO; XU; ZHANG 2012).

Conclui-se, assim, que as avaliações experimentais dos impactos hidrológicos de mudanças de vegetação permitem ter um razoável grau de conhecimento sobre estes impactos. Qualitativamente os resultados em diferentes locais são relativamente coerentes. Do ponto de vista quantitativo, entretanto, existe uma grande variação entre as bacias. Apesar disso, os resultados em diferentes bacias do mundo podem ser sintetizados na forma de gráficos e equações de regressão, que representam o comportamento médio esperado.

## DESCRIÇÃO GERAL DO MODELO

O modelo de grandes bacias MGB-IPH é um modelo distribuído concebido para simular processos hidrológicos em bacias de grande escala, descrevendo a distribuição espacial dos processos hidrológicos e a influência da vegetação nestas bacias (COLLISCHONN; TUCCI, 2001). Trata-se de um modelo hidrológico distribuído, que, na versão atual, divide a bacia hidrográfica a ser representada em pequenas unidades denominadas minibacias (FAN, 2011). Cada uma das minibacias é dividida ainda em diferentes unidades de resposta hidrológica (URH), de acordo com os tipos de solo e de vegetação.

Os processos representados no MGB-IPH são: a interceptação; o balanço de água no solo; a evapotranspiração; os escoamentos superficiais, subsuperficiais e subterrâneos nas minibacias e o escoamento na rede de drenagem. A bacia hidrográfica deve ser dividida em minibacias, que podem ser agrupadas ainda em sub-bacias. Às minibacias são atribuídas informações como: URH a que estão associadas, dados de precipitação, de temperatura do ar, de umidade relativa, de velocidade do vento, de insolação e de pressão atmosférica.

## Representação da vegetação no modelo MGB-IPH

No presente artigo a descrição do modelo é mais detalhada na forma de representação dos processos de balanço de radiação, evapotranspiração e interceptação; ou seja, os que estão mais diretamente relacionados com a vegetação. Considera-se que os processos de escoamento não são relevantes na representação de impactos de mudanças de vegetação. O detalhamento destes pode ser encontrado em publicações como Collischonn et al. (2007); Collischonn e Tucci (2001), Fan (2011) e Paiva (2009).

## Balanço de radiação

No MGB-IPH a estimativa da radiação líquida disponível é obtida pelo balanço de energia na superfície da terra, que inclui a radiação de ondas curtas, a radiação de ondas longas e o fluxo de calor para o solo, dada por

$$RL_{i,j}^{t+1} = Rn_{i,j}^{t+1} + Rnl_i^{t+1} - G_i^{t+1}, \quad (1)$$

em que  $RL_{i,j}$  é a radiação líquida [ $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ ],  $Rn_{i,j}$  é a radiação de ondas curtas líquida [ $MJ.mm^{-2}.dia^{-1}$ ],  $Rnl_i$  é a radiação de ondas longas líquida [ $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ ] e  $G_i$  é o fluxo de calor para o solo [ $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ ]. Os índices  $t, t + 1, i$  e  $j$  fazem referência ao início do intervalo de tempo, ao final do intervalo de tempo, à minibacia e à URH, respectivamente.

Como dado de entrada no modelo é utilizada a radiação de ondas curtas incidente sobre a superfície, que normalmente é obtida de forma indireta a partir da insolação (número de horas de sol por dia) medida em estações meteorológicas (SHUTTLEWORTH, 1993). Os valores medidos em estações são interpolados para as minibacias e para as URH utilizando a interpolação pelo método do vizinho mais próximo (equivalente aos polígonos de Thiessen). Sendo assim, pode-se estimar a radiação de ondas curtas líquida pela diferença entre a radiação incidente e a refletida, ou seja

$$Rn_{i,j}^{t+1} = R_{i,j}^{t+1}(1 - \alpha_{j,m}), \quad (2)$$

em que  $R_{i,j}$  é a radiação de ondas curtas incidente no topo da atmosfera [ $MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ ] e  $\alpha_{j,m}$  é o albedo correspondente a URH  $j$  e ao mês  $m$  do ano.

O albedo é o coeficiente de refletividade ou fração de radiação solar refletida ao atingir a superfície do solo ou de um corpo. O albedo varia com o

ângulo de incidência da radiação e características como cor, conteúdo de umidade e rugosidade (CHANG, 2006). A tabela 1 apresenta valores médios para o albedo de algumas classes de cobertura vegetal.

**Tabela 1 - Típicos valores de albedo de diferentes tipos de coberturas da superfície**

| Albedo                    | Fonte                        |
|---------------------------|------------------------------|
| Água                      |                              |
| 0,08                      | (SHUTTLEWORTH, 1993)         |
| Florestas altas           |                              |
| 0,11 – 0,16               | (SHUTTLEWORTH, 1993)         |
| Floresta amazônica        |                              |
| 0,134                     | (CULF; FISCH; HODNETT, 1995) |
| Florestas coníferas       |                              |
| 0,05 – 0,10               | (CHANG, 2006)                |
| Florestas mistas          |                              |
| 0,10 – 0,15               | (CHANG, 2006)                |
| Florestas temperadas      |                              |
| 0,15 – 0,20               | (CHANG, 2006)                |
| Cultivos agrícolas        |                              |
| 0,15 – 0,20 (altos)       | (SHUTTLEWORTH, 1993)         |
| 0,20 – 0,26 (baixos)      |                              |
| Pastagens/gramíneas/campo |                              |
| 0,20 – 0,26               | (SHUTTLEWORTH, 1993)         |
| Cerrado brasileiro        |                              |
| 0,13 (época úmida)        | (MIRANDA et al., 1996)       |
| 0,18 (época seca)         |                              |
| Solo exposto              |                              |
| 0,10 (úmido)              | (SHUTTLEWORTH, 1993)         |
| 0,35 (seco)               |                              |

A radiação de ondas longas líquida depende da quantidade de energia emitida pela superfície terrestre e pela atmosfera. Geralmente, a superfície terrestre é mais quente que a atmosfera, gerando um balanço negativo de energia. Essa estimativa é dada por (SHUTTLEWORTH, 1993):

$$Rnl_i^{t+1} = -f_i^{t+1} \epsilon' \sigma (T_i^{t+1} + 273,2)^4, \quad (3)$$

em que  $f$  é um fator de correção de nebulosidade, função da razão entre a energia incidente na superfície ( $R$ ) e a energia máxima incidente ( $Rm_{\acute{a}x}$ ) [ $f_i^{t+1} = R_i^{t+1}/Rm_{\acute{a}x}_i^{t+1}$ ];  $\epsilon'$  é a emissividade da superfície, dada por  $\epsilon' = 0,34,0,14\sqrt{e_a}$ , em que  $e_a$  é a pressão parcial de vapor [kPa];  $\sigma = 4,903 \times 10^{-9} [MJ.m^{-2}.K^{-4}.dia^{-1}]$  e  $T_i$  é a temperatura média do ar a 2 metros do solo [°C].

O fluxo de calor para o solo tem como principal mecanismo a condução e pode ser estimado por

$$G_i^{t+1} = 0,38. (T_i^{t+1} - T_i^t). \quad (4)$$

De acordo com a Equação 1 verifica-se que a energia líquida disponível para a evapotranspiração é maior quanto menor for o albedo (Equação 2). De acordo com os valores apresentados na tabela 1, o albedo dos diferentes tipos de floresta é, normalmente, menor do que o albedo de pastagens, ou de cultivos agrícolas. Assim, considerando a influência do albedo, de forma isolada, a consequência do desmatamento é uma redução da evapotranspiração e um aumento do escoamento superficial, o que está de acordo com os resultados experimentais em bacias pareadas.

### Interceptação

A interceptação, ou retenção da água da chuva pela vegetação, é simulada através de um reservatório cuja capacidade máxima é dependente da cobertura vegetal. A precipitação que atinge uma URH de uma minibacia é estimada por interpolação dos dados de postos pluviométricos próximos, a cada passo de tempo, utilizando a técnica de ponderação pelo inverso da distância. O volume máximo de água da chuva que é interceptada depende de um fator, que é a capacidade do reservatório de interceptação. A estimativa desse reservatório de interceptação é dada por

$$Sm_{\acute{a}x}_j = \beta. IAF_{j,m} \quad (5)$$

em que  $Sm_{\acute{a}x}_j$  é a capacidade do reservatório de interceptação da URH  $j$ ;  $\beta$  é o parâmetro de lâmina de interceptação e  $IAF_j$  é o índice de área foliar, que pode assumir diferentes valores para cada mês  $m$  do ano.

O IAF corresponde à relação entre a área foliar do dossel e a área projetada no solo. O IAF da vegetação depende das espécies presentes, do estágio de desenvolvimento da vegetação, da sazonalidade e da prática de manejo, entre outros (JONCKHEERE et al., 2004). A tabela 2 apresenta o valor do IAF para diversos tipos de vegetação encontrados na literatura.

Em aplicações anteriores do modelo MGB-IPH considerou-se  $\beta = 0,2$ , seguindo o valor adotado por Ludwig e Bremicker (2006) e Ubarana (1996). Entretanto, os valores interceptados estimados pelo modelo eram subestimados, quando comparados com os trabalhos de Cuartas et al. (2007), de Sari (2011) e de Vieira e Palmier (2006). Sendo assim, a fim de ajustar o tamanho do reservatório de interceptação, adotou-se neste trabalho  $\beta = 0,4$ . O balanço hídrico do reservatório de interceptação no modelo é dado por:

$$S_{i,j}^{t+1/2} = \min (S_{i,j}^t + PC_i, Smáx_j), \quad (6)$$

$$P_i = PC_i - (S_{i,j}^{t+1/2} - S_{i,j}^t), \quad (7)$$

$$S_{i,j}^{t+1} = S_{i,j}^{t+1/2} - EI_{i,j}, \quad (8)$$

sendo  $EI_{i,j} = \min (S_{i,j}^{t+1/2}, EPI_{i,j})$ ,

$$E_{i,j} = \left( \frac{\Delta(RL - G) + \rho_A \cdot c_p \left( \frac{e_s - e_d}{r_a} \right)}{\Delta + \gamma \left( 1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \right) \left( \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \right), \quad (9)$$

em que,  $S_{i,j}$  é a lâmina de água interceptada [mm],  $PC_i$  é a precipitação no topo do dossel [mm],  $P_i$  é a precipitação que atinge o solo [mm],  $EI_{i,j}$  é a evaporação real da lâmina interceptada [mm] e  $EPI_{i,j}$  é a evaporação potencial da lâmina interceptada [mm]. A  $EPI_{i,j}$  é estimada pela equação de Penman-Monteith com resistência superficial nula.

De acordo com a Equação 5, verifica-se que a interceptação da chuva é maior quando a vegetação tem um IAF maior. Em outras palavras, a interceptação da chuva em florestas, que tem IAF maior, é maior do que em áreas de pastagem ou de agricultura, em que o IAF é, tipicamente, menor. Considerando a influência deste parâmetro de forma isolada, a consequência do desmatamento é uma redução da interceptação e, por consequência, da evapotranspiração. Em decorrência disso ocorre um aumento do escoamento, o que está de acordo com os resultados experimentais em bacias pareadas.

**Tabela 2 - Valores típicos do índice de área foliar (IAF) de diferentes tipos de vegetação**

| IAF                              | Fonte                                 |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Cerrado brasileiro               |                                       |
| 1,0 (est. úmida) 0,4 (est. seca) | (MIRANDA et al., 1996)                |
| Pastagem                         |                                       |
| 0,66 – 2,45                      | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)            |
| 0,49 – 3,90                      | (ROBERTS et al., 1996)                |
| 2,63±0,77                        | (CARUZZO; ROCHA, 2000)                |
| 2,0±0,79                         | (ZANCHI et al., 2009)                 |
| Floresta decídua                 |                                       |
| 4,97±1,27                        | (CARUZZO; ROCHA, 2000)                |
| Floresta conífera                |                                       |
| 1,7 – 5,3                        | (PIERCE; RUNNING, 2003)               |
| Floresta amazônica               |                                       |
| 4,63 – 6,10                      | (ROBERTS et al., 1996)                |
| 2,97 – 9,60                      | (HONZÁK et al., 1996)                 |
| Culturas anuais                  |                                       |
| 4,7 – 7,6 <sup>a</sup>           | (FONTANA; BERLATO; BERGAMASCHI, 1992) |
| 2,8 – 6,2 <sup>b</sup>           | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)            |
| 1,26 – 3,07 <sup>c</sup>         | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)            |
| 0,12 – 3,34 <sup>d</sup>         | (XAVIER; VETTORAZZI, 2003)            |

Nota: <sup>a</sup> soja irrigada no auge do ciclo; <sup>b</sup> soja não irrigada no auge do ciclo; <sup>c</sup> milho e <sup>d</sup> cana-de-açúcar

### Evapotranspiração

A evapotranspiração é estimada no MGB-IPH, para cada minibacia e URH, utilizando a equação de Penman-Monteith, dada por

em que E é a evaporação da água [mm.dia<sup>-1</sup>];  $\lambda$  é o calor latente de vaporização [MJ.kg<sup>-1</sup>];  $\Delta$  é a taxa de variação da pressão de saturação do vapor [kPa.°C<sup>-1</sup>];  $\rho_A$  é a massa específica do ar [kg.m<sup>-3</sup>];  $\rho_w$  a massa específica da água [kg.m<sup>-3</sup>];  $c_p$  é o calor específico do ar úmido ( $c_p = 1,013 \times 10^3$  [MJ.kg<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>]);  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor [kPa];  $e_d$  é a pressão do vapor [kPa];  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\gamma = 0,66$  [kPa.°C<sup>-1</sup>]);  $r_s$  é a resistência superficial da vegetação [s.m<sup>-1</sup>] e  $r_a$  é a resistência aerodinâmica [s.m<sup>-1</sup>].

Este método de estimativa é baseado em uma rede de resistências, superficial e aerodinâmica, no qual se assume que toda a energia resultante do balanço de energia está disponível às plantas para a evapotranspiração.

A resistência superficial ( $r_s$ ) é a resistência ao fluxo de umidade do solo para a atmosfera através das plantas. Esse fluxo de vapor (transpiração) é

controlado pela abertura e pelo fechamento dos estômatos das plantas, isto é, uma resistência puramente fisiológica (CALDER, 1993). De forma simplificada, pode-se dizer que o sistema solo-planta-atmosfera controla a absorção de água do solo através do gradiente de energia, ou gradiente de potencial de água, que é afetado pela pressão parcial de vapor d'água do sistema. O teor de água no solo e a capacidade do solo para conduzir a água para as raízes também determinam a taxa de transpiração, assim como o alagamento e a salinidade da água do solo (ALLEN et al., 1998).

No modelo MGB-IPH, a  $r_s$  é dependente do conteúdo de umidade do solo, semelhante ao apresentado por Wigmosta et al. (1994), ou seja

$$r_s = f \cdot r_{smin}, \tag{10}$$

em que  $r_{smin}$  é a resistência superficial mínima, que ocorre em condições de suprimento adequado de água no solo, e  $f$  é uma função, tal que a resistência possa ser corrigida devido ao déficit de umidade no solo:

$$\frac{1}{f} = 1 \text{ se } W_{L,i,j} \leq W_{i,j}, \tag{11}$$

$$\frac{1}{f} = \frac{(W_{i,j}^t - W_{PM,i,j})}{(W_{L,i,j} - W_{PM,i,j})} \text{ se } W_{PM} < W_{i,j}^t$$

sendo  $W_{i,j}$  [mm] o conteúdo de água no solo;  $W_{L,i,j}$  [mm] o limite de umidade do solo acima do qual não ocorrem restrições na evapotranspiração, no MGB-IPH definido como sendo igual a 50% do conteúdo máximo de umidade disponível no solo ( $W_m$  [mm]); e  $W_{PM,i,j}$  [mm] o ponto de murcha, sendo igual a 10% do  $W_m$ .

Alguns valores de resistência superficial mínima para diferentes classes de vegetação são apresentados na tabela 3. Como podem ser observados, os valores citados na literatura para a  $r_{smin}$  variam em uma ampla faixa, o que dificulta a sua determinação para diferentes usos e coberturas da terra, uma vez que este está fortemente relacionado a fatores fisiológicos, a quantidade de água no solo e as condições ambientais, como disponibilidade de energia, vento, umidade e temperatura do ar (ALLEN et al., 1998).

**Tabela 3 - Valores de resistência superficial de diferentes tipos de vegetação adotados ou estimados em trabalhos da literatura**

| $r_s$ [ $s.m^{-1}$ ]           | Fonte                         |
|--------------------------------|-------------------------------|
| <b>Gramíneas</b>               |                               |
| 69 <sup>a</sup>                | Shuttleworth (1993)           |
| 40 <sup>a</sup>                | Hough e Jones (1997)          |
| 71                             | Todorovic (1999)              |
| 40 - 80                        | Hough e Jones (1997)          |
| 100 - 250                      | Bathurst et al. (2004)        |
| <b>Cultivo agrícola</b>        |                               |
| 40                             | Hough e Jones (1997)          |
| 70 - 700                       | Bathurst et al. (2004)        |
| <b>Pastagem</b>                |                               |
| 50-65                          | Bathurst et al. (2011)        |
| <b>Floresta</b>                |                               |
| 110 - 250                      | Bathurst et al. (2004)        |
| 50 - 100                       | Bathurst et al. (2011)        |
| <b>Floresta conífera</b>       |                               |
| 70                             | Hough e Jones (1997)          |
| <b>Floresta decídua</b>        |                               |
| 80 - 180                       | Hough e Jones (1997)          |
| <b>Floresta de terra firme</b> |                               |
| 70 - 160                       | Hough e Jones (1997)          |
| <b>Floresta tropical</b>       |                               |
| 125 <sup>b</sup>               | Granier, Huc e Barigah (1996) |
| <b>Floresta de eucalipto</b>   |                               |
| 111 <sup>c</sup>               | Soares e Almeida (2001)       |
| <b>Solo exposto</b>            |                               |
| 100                            | Hough e Jones (1997)          |

Nota: <sup>a</sup> grama idealizada na evapotranspiração de referência; <sup>b</sup> condutância máxima estimada de 0,008  $m.s^{-1}$ ; <sup>c</sup> condutância máxima estimada de 0,009  $m.s^{-1}$ .

A taxa de transferência de vapor d'água a partir da superfície do solo ocorre por difusão turbulenta e é controlado pela resistência aerodinâmica (SHUTTLEWORTH, 1993). Essa resistência é inversamente proporcional à velocidade do vento e muda com a altura da vegetação, sendo assim

$$r_{a,i,j} = \frac{\ln \frac{(z_u - d)}{0,123 \cdot h} \cdot \ln \frac{(z_e - d)}{0,0123 \cdot h}}{k^2 \cdot U}, \tag{12}$$

em que  $z_u$  [m] é a altura em que são realizadas as medições de velocidade do vento;  $z_e$  [m] é a altura em que são realizadas as medições de umidade relativa do ar;  $U$  [ $m.s^{-1}$ ] é a velocidade do vento medido na altura  $z_u$ ;  $k$  é a constante de von Kármán (0,41[-]);  $h$  [m] é a altura média da cobertura vege-

tal e  $d$  é obtido tal que  $d = 0,67 \cdot h$ . Os valores adotados no modelo MGB-IPH para a altura média da cobertura vegetal podem ser vistos na tabela 4.

De acordo com a Equação 12, verifica-se que, para uma mesma velocidade do vento, a resistência aerodinâmica é menor quando a vegetação tem uma altura média maior, ou seja, a redução da  $r_a$  provoca um aumento da evapotranspiração. Isto é, a resistência aerodinâmica de florestas é menor do que a resistência aerodinâmica das áreas de pastagem, ou agricultura, em que a altura média da vegetação é menor. Tomando por base apenas a influência deste parâmetro, a consequência do desmatamento é uma redução da evapotranspiração e o aumento do escoamento superficial, o que está de acordo com os resultados experimentais.

**Tabela 4 - Valores para a altura média da vegetação normalmente adotados no modelo MGB-IPH**

| Tipo de cobertura  | Altura (m) |
|--------------------|------------|
| Floresta           | 10,00      |
| Cerrado            | 5,00       |
| Pastagem amazônica | 0,53       |
| Campo, pastagem    | 0,50       |
| Agricultura        | 0,50       |

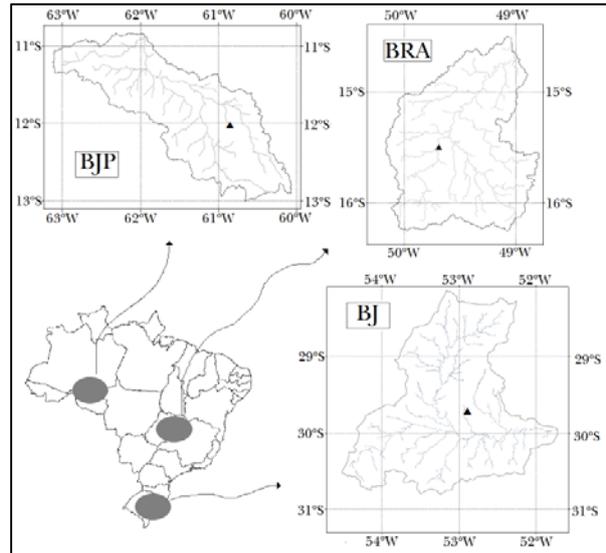
Fonte: (Collischonn, 2001)

### ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO MGB-IPH AOS PARÂMETROS DA VEGETAÇÃO

Para avaliar a sensibilidade do modelo MGB-IPH a mudanças de uso da terra foi realizada uma simulação na bacia hidrográfica do Rio das Almas, denominada neste trabalho de BRA, localizada na cabeceira do rio Tocantins, Estado de Goiás (Tabela 5 e Figura 2). A aplicação do modelo foi realizada seguindo o exemplo descrito em Collischonn et al. (2010).

**Tabela 5 - Bacias hidrográficas estudadas**

| Bacia              | Sigla | Área [km <sup>2</sup> ] | Latitude aproximada [S] |
|--------------------|-------|-------------------------|-------------------------|
| Rio Ji-Paraná (RO) | BJP   | 33.200                  | 12°                     |
| Rio das Almas (GO) | BRA   | 18.800                  | 15°                     |
| Rio Jacuí (RS)     | BJ    | 42.400                  | 30°                     |



**Figura 2 - Localização das bacias hidrográficas do rio Ji-Paraná (BJP), do rio das Almas (BRA) e do rio Jacuí (BJ). Pontos em destaque nos mapas referem-se aos pluviômetros utilizados na caracterização da sazonalidade de chuvas (Figura 4)**

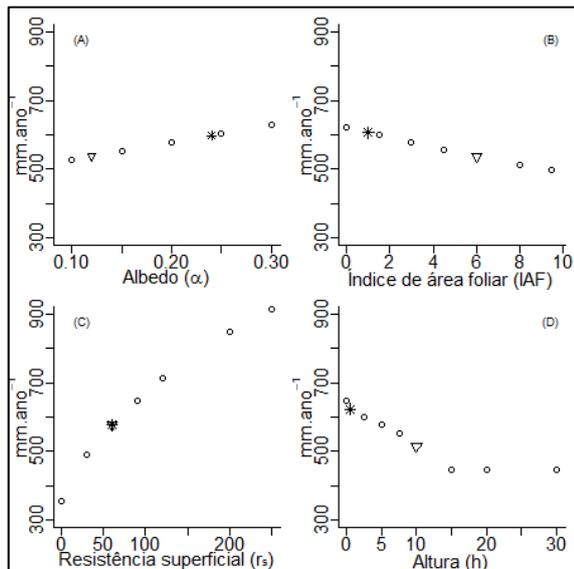
Para esta aplicação o modelo não foi calibrado, ou seja, os valores para os parâmetros calibráveis foram arbitrados a partir de aplicações anteriores em diversas bacias, tais que  $W_m = 600 [mm]$ ;  $b = 0,1 [-]$ ;  $K_{bas} = 1,0 [mm \cdot dia^{-1}]$ ;  $K_{int} = 2,0 [mm \cdot dia^{-1}]$ ;  $xl = 0,6 [-]$ ;  $Cap = 0 [mm \cdot dia^{-1}]$ ;  $W_c = 0,1 [mm]$ ;  $C_s = 1 [-]$ ;  $C_i = 100 [-]$ ;  $C_b = 2300 [dias]$  e  $Q_b = 0,01 [m^3 \cdot s^{-1}]$ .

Para os parâmetros IAF,  $r_s$ ,  $h$  e  $\alpha$  foram realizadas variações sequenciais, um parâmetro por vez a partir de um conjunto de referência, respeitando os intervalos apresentados na tabela 6, determinados de acordo com os valores encontrados na literatura. Assim, foram geradas séries de vazões simuladas pelo MGB-IPH para um período de 14 anos na bacia BRA. A sensibilidade do modelo foi avaliada pelo percentual de alteração na vazão média de longo termo.

**Tabela 6 - Intervalo de variação dos valores dos parâmetros relacionados com a evapotranspiração para análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH**

| Parâmetro              | Valor mínimo | Valor de referência | Valor máximo |
|------------------------|--------------|---------------------|--------------|
| $\alpha [-]$           | 0,10         | 0,20                | 0,30         |
| IAF [-]                | 0,1          | 3,0                 | 9,5          |
| $r_s [s \cdot m^{-1}]$ | 0            | 60                  | 250          |
| $h [m]$                | 0,5          | 5,0                 | 30,0         |

Na figura 3 podem ser observados os resultados das simulações, em termos da vazão média de longo termo, e como cada parâmetro atua na geração do escoamento. Os parâmetros  $IAF$  e  $h$  são inversamente proporcionais à vazão gerada na bacia, uma vez que quanto maior o  $IAF$  maior será a interceptação na bacia e, quanto maior a  $h$  maior a facilidade nas trocas aerodinâmicas, ambos favorecendo o processo de evaporação.



**Figura 3 - Vazão média de longo termo na bacia do rio das Almas (GO) em função dos parâmetros: (A) albedo, (B) índice de área foliar, (C) resistência superficial e (D) altura média da vegetação. Os valores indicados por  $\nabla$  se referem à condição de floresta e por \* à condição de pastagem**

Já os parâmetros  $\alpha$  e  $r_s$  são diretamente proporcionais à vazão gerada na bacia, pois quanto maior o  $\alpha$  maior a energia refletida pela superfície e, conseqüentemente menos energia estará disponível para o processo de evaporação. Em relação à  $r_s$ , o seu aumento implica em uma menor perda por transpiração, logo haverá mais água disponível para gerar escoamento.

Os valores indicados com os símbolos de  $\nabla$  e de \* na figura 3, de acordo com os dados obtidos na literatura, caracterizam condições de floresta e de pastagem, respectivamente. Esses valores serão adotados na etapa seguinte do trabalho.

Ao considerar-se o intervalo de variação individual nos valores dos parâmetros do modelo MGB-IPH em 50%, a sensibilidade nas simulações diminui na seguinte ordem:  $r_s$ ,  $\alpha$ ,  $h$  e  $IAF$ .

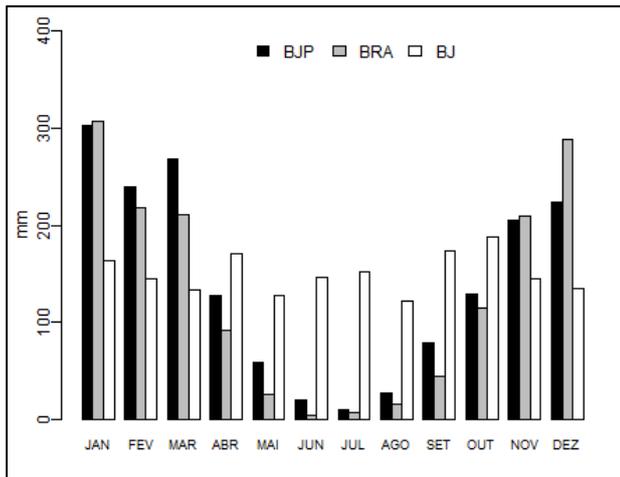
Para variações nos parâmetros acima de 50% a sensibilidade mantém um comportamento semelhante, mostrando que as vazões médias calculadas pelo MGB-IPH dependem dos parâmetros relacionados com a vegetação. Alterações nos valores desses parâmetros produzem impactos de aumentos e diminuições nas vazões coerentes com os verificados em bacias experimentais.

## ANÁLISE COMPARATIVA COM SÍNTESE DE ESTUDOS EXPERIMENTAIS

Na segunda fase da análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH às alterações da vegetação, foram simuladas três bacias hidrográficas em diferentes regiões climáticas do Brasil: Sul, Centro Oeste e Norte. Em cada uma destas bacias o modelo hidrológico foi aplicado considerando cenários em que, inicialmente, 100% da bacia era coberta por florestas. Depois, foram realizadas simulações em etapas progressivas de desmatamento, impondo uma condição de pastagem após o desmatamento, até chegar ao cenário em que 100% da bacia estava coberta por pastagens. Os resultados destas simulações foram comparados aos resultados de estudos experimentais em bacias pareadas, apresentadas por Bosh e Hewlett (1982) e Trimble, Weirich e Hoag (1987), sintetizados na figura 1, em termos do aumento da vazão média de longo termo.

As bacias hidrográficas consideradas na simulação foram: a bacia hidrográfica do Rio das Almas, afluente do rio Tocantins, no Estado de Goiás, já descrita no item anterior, com simulações no período de 01/01/1974 até 31/12/1988; a bacia hidrográfica do rio Ji-Paraná (BJP), localizada no Estado de Rondônia e afluente do rio Madeira, com simulações no período de 01/01/1991 até 31/12/2005; e a bacia hidrográfica do rio Jacuí (BJ), localizada no Estado do Rio Grande do Sul e afluente do rio Guaíba, com simulações no período de 01/01/1986 até 31/12/2005. As características das bacias e suas localizações são apresentadas na tabela 5 e na figura 2.

A sazonalidade das chuvas nas três bacias utilizadas no estudo é apresentada na figura 4. As bacias BJP e BRA possuem duas estações bem definidas, a úmida, de outubro a abril, e a seca, de maio a setembro. Já na BJ, localizada na região Sul, as chuvas médias são bem distribuídas ao longo do ano, sem caracterizar períodos de estiagem.



**Figura 4 - Chuvas médias mensais caracterizadas pelos postos pluviométricos: Marco Rondon (código ANA 116000) para a BJP; Uruana (código ANA 1549009) para a BRA e Botucarai (código ANA 2952003) para a BJ**

Em cada uma das bacias foi realizada a discretização em minibacias e foram adotadas duas unidades de resposta hidrológica: florestas e pastagens. As alterações de uso e cobertura da terra foram definidas no MGB-IPH pela magnitude dos parâmetros  $IAF$ ,  $r_s$ ,  $h$  e  $\alpha$ . Com base na literatura, os valores dos parâmetros adotados para a floresta foram:  $\alpha = 0,12$ ;  $IAF = 6$ ;  $h = 10\text{ m}$  e  $r_s = 60\text{ s.m}^{-1}$ . Na condição de pastagem, os valores adotados foram:  $\alpha = 0,24$ ;  $IAF = 1$ ;  $h = 0,5\text{ m}$  e  $r_s = 60\text{ s.m}^{-1}$ . O parâmetro de resistência superficial foi adotado idêntico para a floresta e para a pastagem, semelhante à metodologia aplicada por Bathurst et al. (2004).

Os outros parâmetros importantes do modelo foram arbitrados de maneira idêntica para as três bacias hidrográficas a partir de aplicações anteriores em diversas bacias, como descrito no item anterior. Isto significa que o modelo não foi calibrado especificamente para cada uma das bacias hidrográficas.

Em cada uma das simulações foram calculados os valores médios de precipitação, escoamento e evapotranspiração. A tabela 7 apresenta estes resultados nos dois cenários extremos de uso da terra: 100% florestas e 100% pastagens. Vale ressaltar que, não é apresentada a parcela do balanço hídrico de variações no volume de água armazenada no solo. Essa variação é função das demandas hídricas do sistema e pode ser positivo, quando a entrada d'água é superior a saída, e negativo quando a de-

manda de saída d'água do sistema é superior ao volume de entrada.

Observa-se que as bacias apresentam valores semelhantes de precipitação (Tabela 7), variando entre  $1851\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJP, até  $1679\text{ mm.ano}^{-1}$  na BRA.

No cenário em que a bacia está completamente coberta por florestas a evapotranspiração é de  $1227\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJP; de  $1241\text{ mm.ano}^{-1}$  na BRA; e de  $1327\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJ (Tabela 7). No cenário em que a bacia está completamente coberta por pastagem, os valores da evapotranspiração são de  $946$ ,  $998$ , e  $957\text{ mm.ano}^{-1}$ , respectivamente nas bacias do rio Ji-Paraná, do rio das Almas; e do rio Jacuí. Observa-se que a magnitude da evapotranspiração média anual é semelhante nas três bacias, apesar de estarem localizadas em regiões climáticas distintas.

**Tabela 7 - Comparação das médias de longo período das componentes do balanço hídrico simuladas na condição de floresta e de pastagem para toda a bacia**

|    | Floresta [ $\text{mm.ano}^{-1}$ ] |      |      | Pastagem [ $\text{mm.ano}^{-1}$ ] |      |      |
|----|-----------------------------------|------|------|-----------------------------------|------|------|
|    | BJP                               | BRA  | BJ   | BJP                               | BRA  | BJ   |
| P  | 1843                              | 1697 | 1676 | 1843                              | 1697 | 1676 |
| I  | 369                               | 312  | 248  | 71                                | 59   | 48   |
| ET | 1227                              | 1241 | 1327 | 946                               | 998  | 957  |
| Q  | 612                               | 449  | 351  | 892                               | 693  | 725  |
| C  | 0,33                              | 0,26 | 0,21 | 0,48                              | 0,41 | 0,43 |

Nota: P é a precipitação; I é a interceptação; ET é a evapotranspiração; Q é a vazão e C é o coeficiente de escoamento ( $Q/P$ ).

A vazão média de longo termo nas três bacias passou de  $612$ ,  $449$  e  $351\text{ mm.ano}^{-1}$  na condição de bacia coberta por florestas, para  $892$ ,  $693$  e  $725\text{ mm.ano}^{-1}$  na condição de bacia 100% coberta por pastagens, nas bacias BJP, BRA e BJ, respectivamente. Todas as bacias apresentaram aumento de escoamento com o desmatamento. O aumento simulado foi de  $281\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJP, de  $244\text{ mm.ano}^{-1}$  na BRA, e de  $374\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJ. A bacia do rio Jacuí (BJ) apresenta, portanto, a maior alteração da vazão média de longo termo, seguida da bacia do rio Ji-Paraná (BJP).

A interceptação apresentou uma redução drástica, aproximadamente de 81% nas três bacias estudadas ( $298\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJP,  $253\text{ mm.ano}^{-1}$  na BRA e  $200\text{ mm.ano}^{-1}$  na BJ), quando a floresta foi substituída por pastagem. A interceptação estimada na condição de floresta corresponde a 20% de P na BJP; a 18% de P na BRA e a 15% de P na BJ. Neste

sentido, a interceptação, fortemente influenciada pela vegetação, possui os valores simulados coerentes com a literatura.

O coeficiente de escoamento (última linha na tabela 7) aumenta com o desmatamento, passando de 0,33; 0,26; e 0,21 com floresta, para 0,48; 0,41; e 0,43 com pastagens, nas bacias BJP, BRA e BJ, respectivamente.

Os valores estimados de evapotranspiração pelo MGB-IPH para a condição de floresta e de pastagem estão de acordo com os obtidos por Shuttleworth (1988), de 1335,9 mm.ano<sup>-1</sup> para uma região de floresta amazônica; por Rodriguez (2011), de 1237,4 mm.ano<sup>-1</sup> para florestas e de 985 mm.ano<sup>-1</sup> para pastagem. Ou seja, a modificação de parâmetros como albedo, resistência superficial e altura média da vegetação, diretamente relacionados a características da vegetação, como mencionado anteriormente, implica em alterações como aumentos e reduções na evapotranspiração que são coerentes com a literatura.

A figura 5 é uma repetição da figura 1, com os resultados das bacias experimentais sintetizados por Bosh e Hewlett (1982) e por Trimble, Weirich e Hoag (1987), aos quais foram acrescidos os resultados das simulações de desmatamento nas três bacias descritas aqui. A linha contínua mais espessa apresenta a linha de regressão proposta por Trimble, Weirich e Hoag (1987). As outras linhas apresentam os resultados das simulações apresentadas no presente artigo. Observa-se que a tendência geral dos resultados da simulação é semelhante à tendência dos resultados experimentais.

Os resultados de incremento de vazão nas bacias dos rios das Almas e Ji-Paraná são ligeiramente inferiores à linha de regressão proposta por Trimble, Weirich e Hoag (1987), enquanto os incrementos na bacia do rio Jacuí são ligeiramente superiores aos da linha de regressão. Esta sensibilidade maior na bacia do rio Jacuí, localizada no RS, pode estar relacionada a um regime de chuvas mais regular, em que os períodos de déficit hídrico no solo são mais curtos e raros, e a evapotranspiração real (calculada pelo modelo) se aproxima mais da potencial.

Comparando os resultados, obtidos nas simulações com o modelo MGB-IPH, aos estimados pela equação proposta por Trimble, Weirich e Hoag (1987) verifica-se que o desempenho do modelo está em sintonia com o comportamento médio dos resultados obtidos em bacias experimentais.

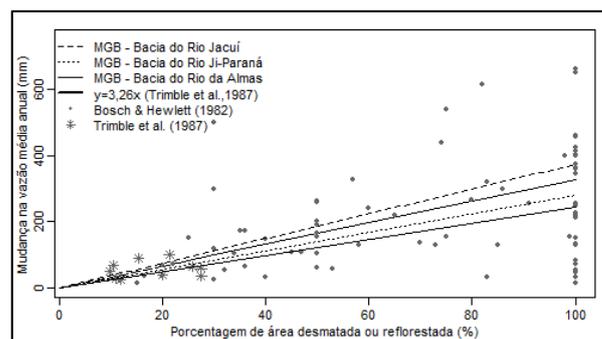


Figura 5 - Efeito do desmatamento ou do reflorestamento na vazão média de longo termo nas bacias do rio Ji-Paraná, do rio das Almas e do rio Jacuí

## CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que as vazões médias de longo termo calculadas pelo modelo MGB-IPH dependem dos parâmetros relacionados à vegetação. A alteração dos valores destes parâmetros provoca impactos de aumento ou diminuição da vazão média de longo termo que são coerentes com os resultados encontrados em bacias experimentais.

A magnitude dos impactos nas vazões médias de longo termo simuladas nos estudos de casos, em que foi simulado o desmatamento, possui a mesma ordem de grandeza que os resultados de estudos experimentais em um grande número de bacias pareadas. Pode-se dizer que o modelo MGB-IPH é capaz de representar os impactos hidrológicos associados ao desmatamento de forma satisfatória, apesar das incertezas inerentes ao processo e aos parâmetros.

A análise de sensibilidade do modelo MGB-IPH aos parâmetros relacionados com a evapotranspiração revela que há uma grande incerteza relacionada ao parâmetro resistência superficial da vegetação, que, de forma simplificada neste estudo, foi considerada igual para a floresta e para a pastagem. Devido à relação deste parâmetro a fatores fisiológicos das plantas, se esperaria que uma boa alternativa para a sua estimativa seria considerar a resistência superficial função do índice de área foliar, conforme sugerido por Shuttleworth (1993).

Na análise realizada aqui não foram realizadas alterações no parâmetro de armazenamento de água no solo ( $W_m$ ), que indica o volume de água no solo disponível, nem foram consideradas as diferenças entre a profundidade das raízes da floresta e da pastagem. É de se esperar que, caso o  $W_m$  fosse in-

cluído nas análises, ou ainda, que as profundidades das raízes fossem consideradas, as diferenças de evapotranspiração e de escoamento em florestas e em pastagens pudessem se acentuar. Para isto, recomenda-se analisar os mesmos cenários em modelos com o balanço de água no solo mais complexo, com capacidade de representar o armazenamento do solo em diferentes camadas e com capacidade de representar o fluxo da água em meio não saturado.

É importante destacar, também, que, com o objetivo de simplificar a análise, os resultados das simulações nas três bacias apresentadas neste artigo foram obtidos sem calibrar o modelo hidrológico previamente para cada uma das bacias, e devem ser interpretados em termos relativos, e não absolutos.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. *Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements)*. Rome: FAO, 1998. 326 p. (FAO irrigation and drainage paper, n. 56).
- ANDREÁSSIAN, V. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology*, v. 291, n. 1-2, p. 1-27, 2004.
- BATES, C. G., HENRY, A. J. *Forest and streamflow experiment at Wagon Wheel Gap, Colorado*. Final Report on Completion of the Second Phase of the Experiment. Washington: U.S. Government Printing Office, 1928. 79 p. (Monthly weather review supplement 30).
- BATHURST, J. C.; BIRKINSHAW, S. J.; CISNEROS, F.; FALLAS, J.; IROUMÉ, A.; ITURRASPE, R.; NOVILLO, M. G.; URCIUOLO, A.; ALVARADO, A.; COELLO, C.; HUBER, A.; MIRANDA, M.; RAMIREZ, M.; SARANDÓN, R. Forest impact on floods due to extreme rainfall and snowmelt in four Latin American environments 2: model analysis. *Journal of Hydrology*, v. 400, n. 3-4, p. 292-304, 2011.
- BATHURST, J. C.; EWEN, J.; PARKIN, G.; O'CONNELL, P. E.; COOPER, J. D. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses. *Journal of Hydrology*, v. 287, n. 1-4, p. 74-94, 2004.
- BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiment to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, v. 55, n. 1-4, p. 3-23, 1982.
- BRUIJNZEEL, L. A. *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Netherlands: National Committee of the Netherlands for the International Hydrological Programme of Unesco, 1990.
- CALDER, I. R. Hydrologic effects of land-use change. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 13.1-13.50.
- CARAM, R. O. Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba. 2010. 141 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.
- CARUZZO, A.; ROCHA, H. R. Estimativa do índice de área foliar (IAF) em regiões de pastagem e floresta com o método indireto ('gap fraction') durante o experimento AMC/LBA-1999. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11., 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: [s.n.], 2000.
- CHANG, M. *Forest hydrology: an introduction to water and forests*. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- COE, M. Modeling terrestrial hydrological systems at the continental scale: testing the accuracy of an atmospheric GCM. *Journal of Climate*, v. 13, n. 4, p. 686-704, 2000.
- COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D. G.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007.
- COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C.; PAIVA, R. C. D.; FAN, F. M.; KAYSER, R. H. B. *Manual de exemplos de aplicação do modelo MGB-IPH: rio das Almas*, 2010. 63 p. Versão 2.0.

- COLLISCHONN, W.; TUCCI, E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 6, n. 1, p. 95-118, 2001).
- CUARTAS, L. A.; TOMASELLA, J.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M. G.; WATERLOO, M.; MÚNERA, J. C. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: marked differences between normal and dry years. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 145, n. 1-2, p. 69-83, 2007.
- CULF, A. D.; FISCH, G.; HODNETT, M. G. The albedo of amazonian forest and ranch land. *Journal of Climate*, v. 8, n. 6, p. 1544-1554, 1995.
- DUNN, P. H.; BARRO, S. C.; WELLS, I. I. W. G.; POTH, M. A.; WOHLGEMUNTH, P. M.; COLVER, C. G. *The San Dimas Experimental Forest: 50 years of research*. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station, 1988. (General Technical Report PSW-104).
- ECKHARDT, K.; HAVERKAMP, S.; FOHRER, N.; FREDE, H. G. SWAT-G, a version of SWAT99.2 modified for application to low mountain range catchments. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 27, n. 9-10, p. 641-644, 2002.
- FAN, F.M. *Acoplamento entre modelos hidrológicos e sistemas de informação geográfica: integração do modelo MGB-IPH*. 2011. 186 f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
- FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Alterações micrometeorológicas na cultura da soja submetida a diferentes regimes hídricos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 27, n. 5, p. 661-669, 1992.
- GRANIER, A.; HUC, R.; BARIGAH, S. T. Transpiration of natural rain forest and its dependence on climate factors. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 78, n. 1-2, p. 19-29, 1996.
- HIBBERT, A. R. Forest treatments effects on water yield. In: SOPPER, W. E.; LULL, H. W. (Ed.). *International symposium on forest hydrology*. Oxford: Pergamon, 1967. 813 p.
- HONZÁK, M.; LUCAS, R. M.; AMARAL, I.; CURRAN, P. J.; FOODY, G. M.; AMARAL, S. Estimation of leaf area index and total biomass of tropical regenerating forest: comparison of methodologies. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 365-381.
- HOOVER, M. D. Effects of removal of forest vegetation upon water-yields. *Transaction American Geophysical Union*, v. 25, n. 6, p. 969-975, 1944.
- HOUGH, M. N.; JONES, J. A. The Kingdom Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS version 2.0 – an overview. *Hydrology & Earth System Sciences*, v. 1, n. 2, p. 227-239, 1997.
- JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P. W. M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 121, n. 1-2, p. 19-35, 2004).
- KLEMES, V. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, v. 31, n. 1. p. 13-24, 1986.
- KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; LENTERS, J. D.; YOUNGMOLLING, C.; RAMANKUTTY, N.; NORMAN, J. M.; GOWER, S. T. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 14, n. 3, p 795-825, 2000.
- LUDWIG, K.; BREMICKER, M. (Ed.). *The water balance model LARSIM: design, content and applications*. Germany: Institut für Hydrologie, Universität Freiburg, 2006. (Freiburger schriften zur hydrologie, 22).
- McCULLOCH, J. S. G.; ROBINSON, M. History of forest hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 150, n. 2-4, p. 189-216, 1993.
- MIRANDA, A. C.; MIRANDA, H. S.; LLOYD, J.; GRACE, J.; MCINTYRE, J. A.; MEIR, P.; RIGGAN, P.; LOCKWOOD, R.; BRASS, J. *Carbon dioxide fluxes over a cerrado sensu stricto in central Brazil*. Amazonian deforestation and climate. Chichester: John Wiley, 1996. p. 353-363.

- NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R. WILLIAMS, J. R. *Soil and water assessment tool*. Theoretical documentation. Version 2009. Texas: Texas A&W University System, 2011. 647 p. (Texas Water Resources Institute. Technical report, n. 406).
- PAIVA, R. C. D. *Modelagem hidrológica e hidrodinâmica de grandes bacias*. Estudo de caso: bacia do rio Solimões. 2009. 182 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PIERCE, L. L.; RUNNING, S. W. Rapid estimation of coniferous forest leaf area index using a portable integrating radiometer. *Ecology*, v. 69, n. 6, p. 1762-1767, 1988.
- RAGAB, R; BROMLEY, J. IHMS - Integrated hydrological modelling system. Part 1. Hydrological processes and general structure. *Hydrological Processes*, v. 24, n. 19, p. 2663-2680, 2010.
- ROBERTS, J. M.; CABRAL, O. M. R.; COSTA, J. P.; McWILLIAM, A. L. C.; SÁ, T. D. A. An overview of the leaf area index and physiological measurements during ABRACOS. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 287-306.
- RODRIGUEZ, D. A. *Impactos dos padrões espaciais da vegetação nas variáveis atmosféricas e terrestre do ciclo hidrológico, em bacia de floresta amazônica*. 2011. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
- SARI, V. *Avaliação do processo hidrológico em uma pequena bacia hidrográfica característica do bioma mata atlântica*. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2011.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation. In: MAIDMENT, D. R. (Ed.). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill, 1993. p. 4.1-4.53.
- SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian rainforest. *Proceedings of The Royal Society*, s. B, v. 233, n. 1272, p. 321-346, 1988.
- SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, v. 253, n. 1-4, p. 130-147, 2001.
- SWANK, W. T.; CROSSLEY JR, D. A. *Forest hydrology and ecology at Coweeta*. New York: Springer-Verlag, 1988.
- TODOROVIC, M. Single-layer evapotranspiration model with variable canopy resistance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 125, n. 5, p. 235-245, 1999.
- TRIMBLE, S. W.; WEIRICH, F. H.; HOAG, B. L. Reforestation and reduction of water yield on the Southern Piedmont since circa 1940. *Water Resources Research*, v. 23, n. 3, p. 425-437, 1987.
- UBARANA, V. N. Observation and modeling of rainfall interception loss in two experimental sites in Amazonian forest. In: GASH, J. H. C.; NOBRE, C. A.; ROBERTS, J. M.; VICTORIA, R. L. *Amazonian deforestation and climate*. Chichester: John Wiley, 1996. p. 151-162.
- VIEIRA, C. P.; PALMIER, L. R. Medida e Modelagem da Interceptação da Chuva em uma Área Florestada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 3, p. 101-112, 2006.
- WIGMOSTA, M. S. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. *Water Resources Research*, v. 30, n. 6, p. 1665-1679, 1994.
- WILK, J.; ANDERSSON, L.; PLERMKAMON, V. Hydrological impacts of forest conversion to agriculture in a large river basin in northeast Thailand. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 14, p. 2729-2748, 2001.
- XAVIER, A. C.; VETTORAZZI, C. A. Leaf area index of ground covers in a subtropical watershed. *Scientia Agricola*, v. 60, n. 3, p.425-431, 2003.
- ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M. J.; AGUIAR, L. J. G.; von RANDOW, C.; KRUIJT, B.; CARDOSO, F. L.; MANZI, A. O. Estimativa do Índice de Área Foliar (IAF) e Biomassa em pastagem no estado de Rondônia, Brasil. *Acta Amazônica*. v. 39, n. 2, p. 335-348, 2009.
- ZHANG, L.; VERTESSY, R.; WALKER, G.; GILFEDDER, M.; HAIRSINE, P. *Afforestation in a catchment context: understanding the impacts on water yield and salinity*. Relatório Técnico, Industry

report 1/07, eWater. Melbourne, Austrália: CRC, 2007.

ZHAO, F.; XU, Z.; ZHANG, L. Changes in streamflow regime following vegetation changes from paired catchments. *Hydrological Processes*, v. 26, n. 10, p. 1561-1573, 2012.

### ***Land-Use Sensitivity Analysis In MGB-IPH Model***

#### **ABSTRACT**

The effects of land-use changes on hydrology have been widely discussed for relatively small basins. In large basins, the use of hydrological models to study land-use changes has been an alternative experiment. However, the models must be sensitive to hydrological changes due to land-use modifications in the basin. In this sense, the objective of this study was to assess the sensitivity of the distributed model for large basins (MGB-IPH) in simulating land-use changes. The simulations showed that MGB-IPH is able to perform scenario studies of land-use changes, such as deforestation or reforestation, being consistent with the experimental results available in the literature.

**Keywords:** hydrological models, large basin, flow changes, deforestation.