

ANÁLISE DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA USANDO O MODELO HIDROLÓGICO *ArcEGMO*: ESTUDO DE CASO SEEBACH, ALEMANHA

Tháísa Almeida¹; Frank Voß²; Bernd Pfützner³ & Suzana Montenegro⁴

Resumo - Este trabalho apresenta uma análise da disponibilidade hídrica, utilizando o modelo hidrológico ArcEGMO, para a pequena bacia Seebach, localizada no estado de Thüringen – Alemanha. O balanço hídrico da área foi efetuado utilizando vazão total diária e mensal de duas estações fluviométricas, Flarchheim e Seebach, e baseado em dados meteorológicos da área e de áreas vizinhas que exerceram influência proporcional às suas distâncias da área estudada. O ArcEGMO está baseado em GIS, permitindo a visualização dos dados de entrada, como também correlacioná-los com os resultados. Para o período analisado, o modelo apresentou bons resultados, melhor ajustado para a secção Flarchheim, justificado pelas perdas em Seebach devido às características geológicas da área.

Abstract - This paper presents the water balance analysis for Seebach basin, located in Thuringia State, Germany. ArcEGMO modeling system has been proposed to account for the total flow, surface and groundwater distribution. The water balance has been based on total flow analysis from two fluvial stations, Flarchheim and Seebach, using meteorological and climatological database, from stations located in the area and out of its boundaries. The modelling presented good results, showing a better relation to Flarchheim station, justified by the geology on Seebach's area.

Palavras-chave - Modelagem hidrológica, balanço hídrico, ArcEGMO.

¹ UFPE / TU-Berlin; Bolsista Capes de graduação UFPE; Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n; 50000-000; Recife; PE; Brasil; Fone/fax: +55 81 32718223; fax: +55 81 32718219; thaisaa@terra.com.br

² PIK; Doutorando – Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, P.O. Box 60 12 03, 14412, Potsdam, Alemanha – fone: +49 331 2882683 fax: +49 331 288 2695; voss@pik-potsdam.de

³ BAH Berlin; Dr. – Büro für Angewandte Hydrologie Berlin; Wollankstr. 117; 13187; Berlin, Alemanha – fone: +49 30 48638466; fax: +49 30 48095207; bernd.pfuetzner@bah-berlin.de

⁴ UFPE; Prof Adjunto do Depto de Eng. Civil; Av. Acadêmico Hélio Ramos s/n; 50000-000; Recife; PE; Brasil; +55 81 32718223; fax: +55 81 32718219; suzanam@ufpe.br

INTRODUÇÃO

A importância da otimização do uso dos recursos hídricos vem se destacando no cenário mundial. Nos estudos dos impactos de mudanças climáticas aproximações específicas e modelos matemáticos são tipicamente aplicados e seus resultados são, por sua vez, apropriados para a área sob investigação, objetivando uma avaliação interna da bacia, para discussão e análise de problemas, ou apenas informe de decisões políticas de escala regional a maiores amplitudes. Para os países pertencentes a CEE – Comunidade Econômica Européia, ainda há a exigência da disponibilização de informações em diferentes escalas, para a efetivação do suporte dado pela Comunidade. A CEE exige, como também dá o apoio necessário para se atingir, a supremacia dos padrões de qualidade de água, bem como a otimização do uso dos recursos hídricos, requerendo estudos de disponibilidade hídrica em toda Europa.

A Alemanha, que tem recebido nos últimos anos merecido reconhecimento na eficiência de preservação de recursos naturais junto a instituições governamentais e privadas, desenvolve gradativamente um trabalho de proteção e otimização dos usos dos recursos hídricos. O problema da determinação de vazões fluviométricas a partir da precipitação, evaporação, e outros fatores, é ponto de discussão na hidrologia aplicada. O estudo do balanço hídrico em bacias isoladas vem dando auxílio para elaboração de um processo de predição dos efeitos do desenvolvimento na bacia, decisão de uso e ocupação do solo, proporcionando o controle natural de reservas a combinar disponibilidade e qualidade hídrica objetivadas pela legislação ambiental proposta pela CEE.

Em resposta a esses argumentos, o Ministério Federal de Educação e Pesquisa da Alemanha – BMBF tem financiado projetos de gerenciamento e proteção dos recursos naturais, em parceria com o Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK), Büro für Angewandte Hydrologie Berlin (BAH Berlin) e a Universidade Técnica de Dresden. Instituições como o PIK e o BAH têm contribuído com a utilização de modelagem hidrológica pelo uso do modelo ArcEGMO – desenvolvido por suas equipes.

Trabalhos anteriores (Lahmer e Becker, 1998; Lahmer et al, 2001) apontam o modelo ArcEGMO, entre outros, como o mais promissor sistema de modelagem hidrológica, destacando suas vantagens em suas aplicações e versatilidade, por ser um sistema baseado em SIG (Sistema de Informações Geográficas), permitindo uma integração dos aspectos hidrológicos, geomorfológicos, pedológicos e ecológicos do ecossistema em um contexto espacial, visualizados pelo SIG.

Esse trabalho apresenta a aplicação do modelo ArcEGMO a duas pequenas bacias no sudoeste da Alemanha.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição do estudo e da área

O balanço hídrico foi proposto para duas pequenas bacias de 15,5 Km² e 32,5 Km², chamadas aqui de Flarchheim e Seebach, localizadas nos dois principais afluentes, os rios Cammerbach e Singelbach (figura 1), através da calibração de parâmetros no modelo ArcEGMO. O estudo foi aplicado entre os anos de 1981 a 1996. A área em análise está localizada no estado de Tübingen, sudoeste da Alemanha, a qual é caracterizada pela distribuição regular de chuvas ao longo do ano, com precipitação também em forma de neve nos meses de inverno. A precipitação média anual é de 600 mm e evaporação em tanque classe A é de 750mm. Para os anos de 1988 a 1991, há a caracterização de um período seco, o qual aponta uma precipitação de apenas 300mm anuais.

Com a finalidade de atender à demanda nos meses de verão (maio a agosto), um lago artificial (1,07 Km²) foi construído em Seebach como consequência de um barramento de concreto, o qual exerce influência no cálculo do balanço hídrico.

A região tem uma cobertura vegetal heterogênea, representada por uma floresta de árvores espaçadas, campos de gramíneas e arbustos, agricultura comercial, além de áreas de ocupação urbana (Figura 2).

A bacia possui grande disponibilidade de águas subterrâneas, com grande variação da profundidade do lençol, conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição da profundidade do lençol na área.

Profundidade Máxima (m)	Profundidade de Referência (m)	Distribuição da profundidade na área (%)
0,5	0,25	73,0
1	0,5	3,3
1,5	0,75	3,1
2	1,25	3,5
5	2,5	8,0
10	5	3,0
20	12	6,1

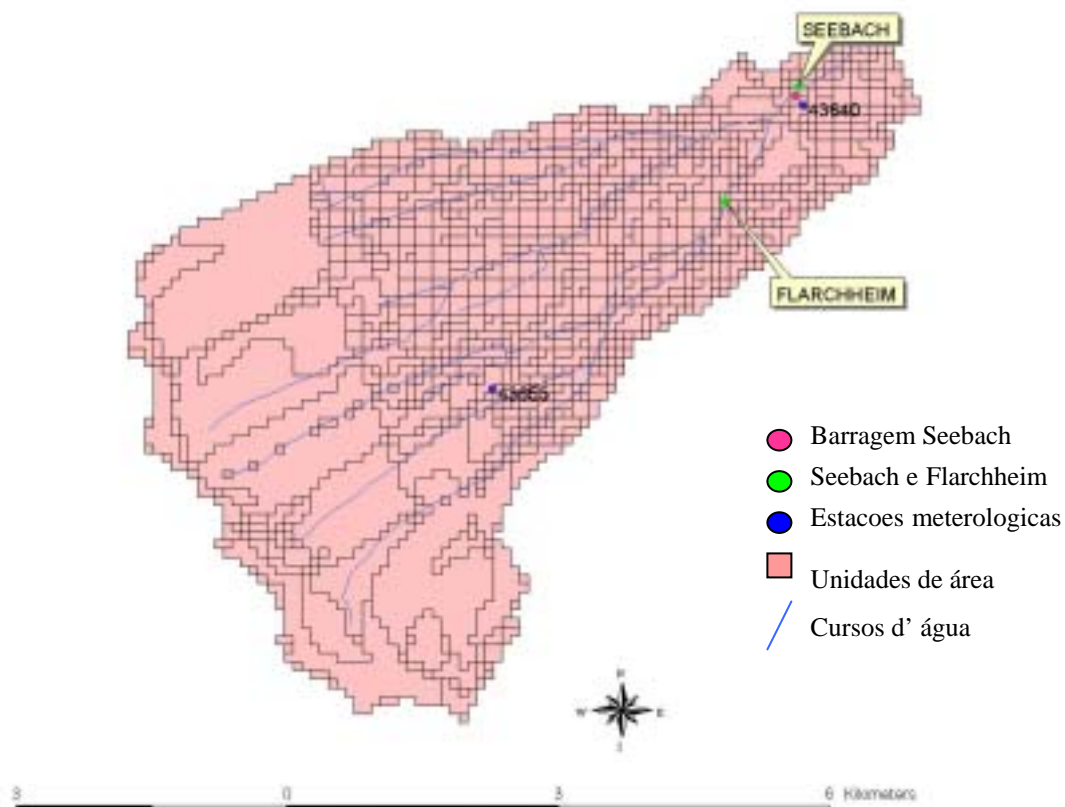


Figura 1. Bacia de captação do Seebach.

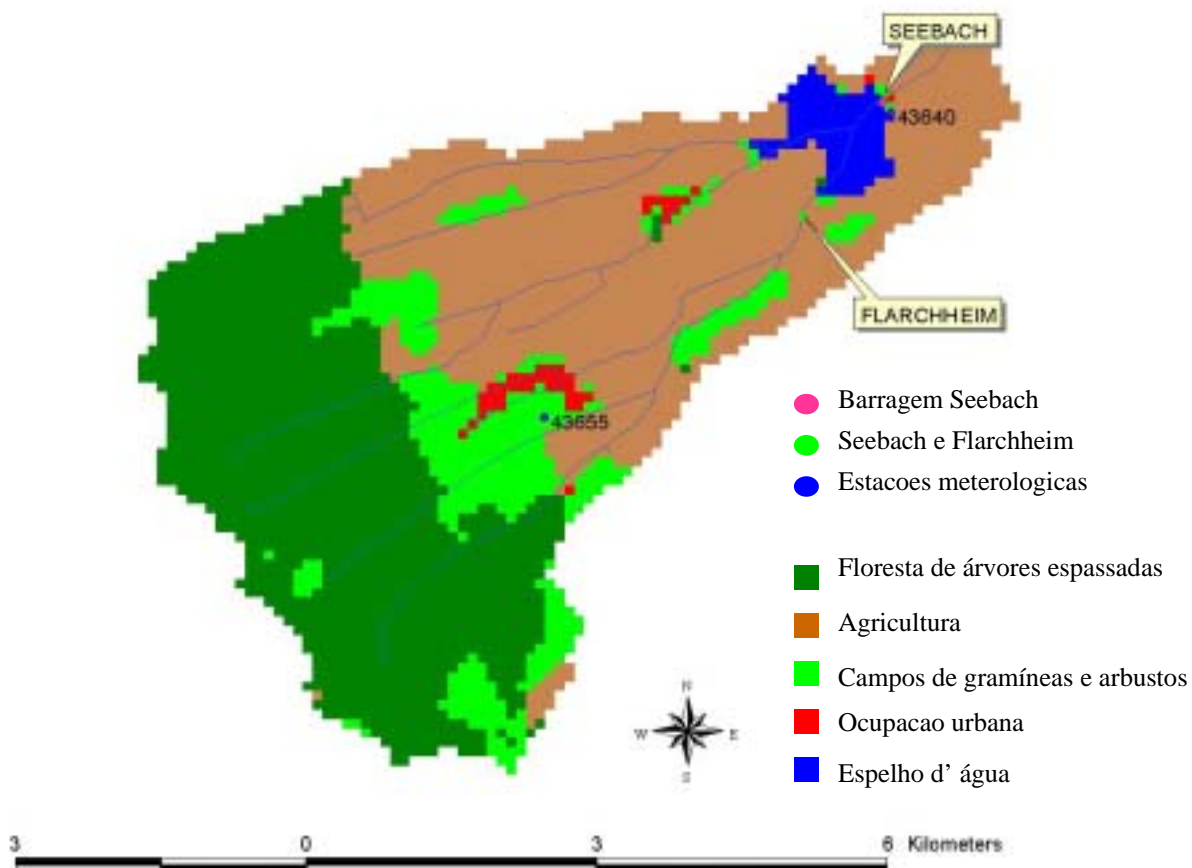


Figura 2. Mapa de uso e ocupação do solo, destacando lago decorrente do barramento em Seebach.

ArcEGMO – estrutura do modelo

O ArcEGMO é um modelo hidrológico desenvolvido em mesoescala que pode ser aplicado a cursos d'água como variáveis extensas, além de permitir estudos no balanço hídrico total. Na aplicação de modelos hidrológicos ao longo dos anos, a idéia de ligação do sistema a um SIG pela necessidade de caracterização da diversidade em diferentes dimensões para as discretizações no tempo e espaço, tornou o ArcEGMO atual um aperfeiçoamento do modelo original EGMO (Becker, 1975). O presente modelo foi criado a partir de algoritmos para uma melhor descrição da concentração de descarga (Pfützner et al, 1997). O atual sistema disponibiliza discretizações espacial e temporal arbitrárias para modelagem hidrológica, possibilitando as características do cenário real (uso e ocupação do solo, vegetação, descrição pedológica, geologia) serem associadas a parâmetros do modelo.

A dependência de um sistema de informações geográficas permite ao ArcEGMO requerer um banco de dados administrado e espacialmente referenciado pelo SIG. Nesse trabalho foi utilizado o programa ArcView. Com a modernidade do auxílio de um sistema georreferenciado, a geometria e os dados reais são inter-relacionados. Os cenários de estudo são figurados nas formas do sistema de informações geográficas – pontos, linhas e superfícies baseadas em sistemas vetoriais ou ainda pela formação de grids –, que são transformados no meio em unidades variáveis: unidades elementares (área mínima de modelagem), unidades hidrotópicas (unidades elementares combinadas, baseados em critérios similares hidrológicos), classes de hidrotópicas (agregações espaciais independentes de algumas unidades hidrotópicas) e outras zonas definidas. O sistema requer ainda regionalização hidrológica, incluindo métodos eficientemente aplicáveis de agregação e desagregação. A resolução temporal pode ser distribuída ainda em dias, meses ou anos (Pfützner et al., 1997).

O modelo apresenta ainda algumas características que merecem destaque:

1. A modelagem ocorre independentemente da geometria dos elementos do espaço discretizado. A superfície descrita pode ser poligonal ou por grid, a depender o melhor ajuste do modelo.
2. Os resultados são armazenados paralelamente aos dados reais e podem ser ligados ao SIG geometricamente, permitindo visualização, análise e avaliação em cartas geradas por tabelas de saída do ArcEGMO.
3. A ligação espacial entre a unidade de área e unidades vizinhas (por relações superficiais ou subterrâneas) deve ser considerada a partir da análise dos dados reais.

A estrutura do ArcEGMO é desenvolvida considerando: processos verticais e laterais, descrevendo respectivamente a formação e a concentração de descargas, que são subdivididos em níveis adicionais (Figura 3). Cada nível do modelo possui uma discretização específica em unidades

de área correspondentes à relevância da influência de cada processo nas características do espaço. Para cada unidade de área é possível atribuir uma ordenação dos subprocessos, sendo os fluxos de dados entre um nível e os níveis subseqüentes relacionados espacialmente e organizados pelo banco de dados do SIG.

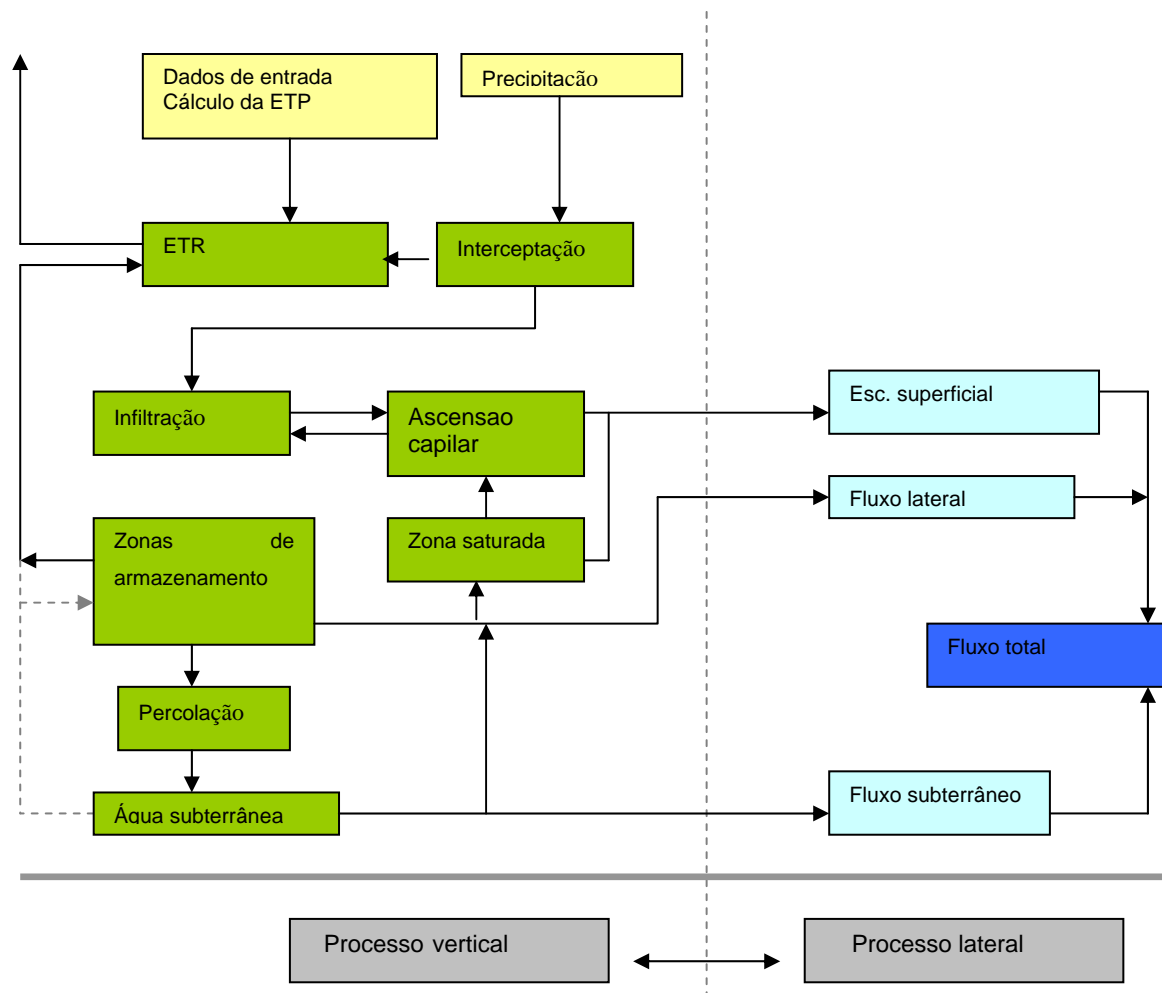


Figura 3. Estrutura do modelo – ArcEGMO. Distribuição dos processos verticais e laterais.

Avaliação da eficiência da aplicação do modelo ArcEGMO sobre o sistema

Para remover a subjetividade do ajuste dos parâmetros do modelo, O'Donnell (1966) sugere a otimização automática, o que implica em sucessivas mudanças de valores paramétricos, os quais são sempre contabilizados como resultados de etapas anteriores e de forma particular comparados e reutilizados em novas etapas. A otimização deverá ser baseada na eficiência do modelo, como também na correlação entre os valores reais e calculados, não sendo um desses índices por si só suficiente para avaliar a qualidade da modelagem.

Neste estudo de caso, os parâmetros que foram submetidos ao ajuste pelo modelo foram a razão entre a evaporação potencial e real e a função de vegetação sobre o sistema, isto é, a

interferência mínima que a vegetação possui na retirada de água do sistema, como também sua parcela na evapotranspiração.

Inicialmente, a otimização necessita de um índice de concordância ou discordância entre os valores observados e calculados. A análise de regressões lineares sugere o critério das somas dos quadrados, como,

$$F^2 = \Sigma(q' - q)^2 \quad (1)$$

onde F^2 é o índice de discordância, q e q' são respectivamente os valores observados e calculados no mesmo intervalo de tempo correspondente. O somatório pode ocorrer em diferentes intervalos de tempo Δt sendo o índice F^2 análogo a variância residual de uma análise de regressão.

A variância inicial F_o^2 pode ser definida como,

$$F_o^2 = \Sigma(q - q_m)^2 \quad (2)$$

onde q_m é a média dos valores observados. Essas equações implicam na determinação da eficiência da modelagem pelo índice R^2 a ser definido pela equação 3:

$$R^2 = \frac{F_o^2 - F^2}{F_o^2} \quad (3)$$

Ainda, a cota média calculada pelo modelo também foi um dos parâmetros a serem avaliados quando comparada à cota média real da seção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Regime de escoamento

Inicialmente foi analisada a relação entre a vazão observada nas seções Flarchheim e Seebach, e a precipitação registrada nas estações meteorológicas 43655 e 43640, localizadas dentro da bacia (figura 1). A correlação entre os eventos de precipitação e o comportamento da vazão se apresenta muito baixa conforme ilustrada na figura 4.

Parte da precipitação ocorre em forma de neve, que de imediato não entra no sistema até o seu derretimento. Essa questão foi analisada na tentativa de explicar o comportamento das variáveis. No entanto, esse aspecto não foi suficiente para justificar a disforme relação. Em seguida, foi

questionada a independência do fluxo subterrâneo quanto ao comportamento do fluxo de vazão nos rios, o que foi considerado e proposto para estudos posteriores.

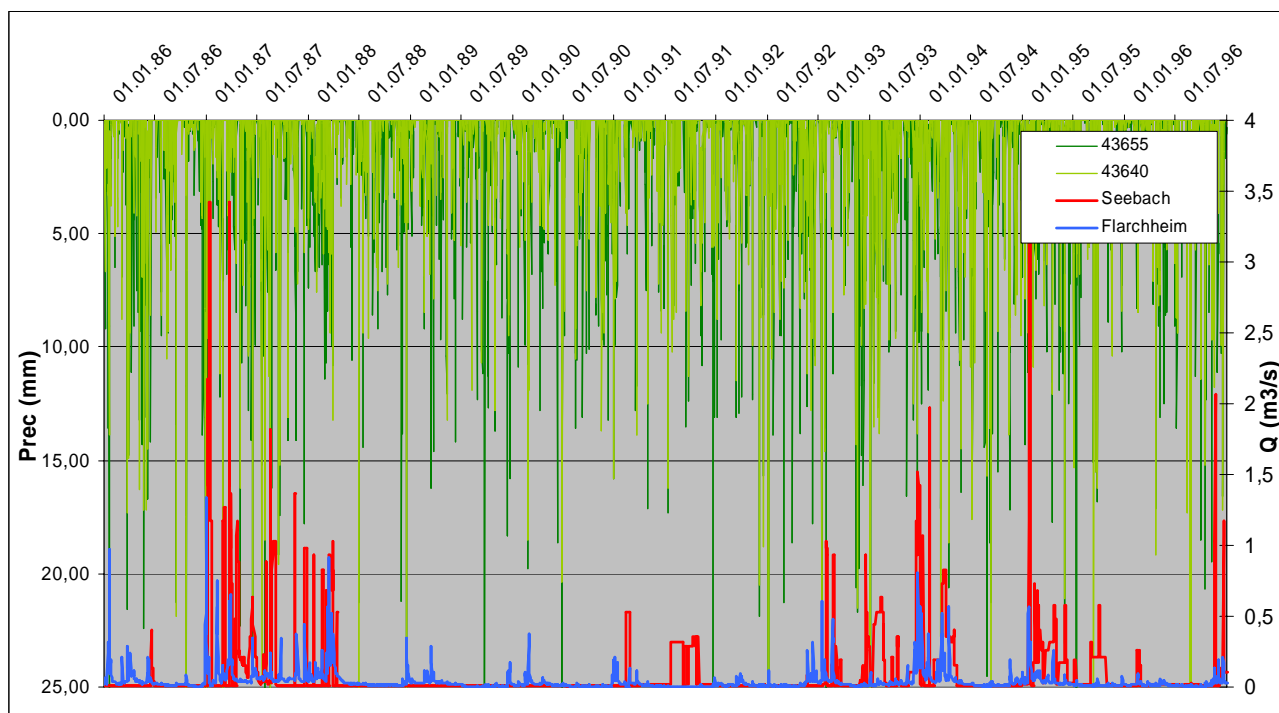


Figura 4. Precipitação para duas estações meteorológicas representativas da área (mm), e a vazão observada nas seções Seebach e Flarchheim (m^3/s), para os anos de 1981 a 1996.

Em todas as simulações, o regime de escoamento ficou exposto à modelagem, na tentativa de matematicamente descrever o comportamento da vazão total (Q_t) nos rios Cammerbach e Singelbach. Diversos cenários combinando propriedades diferentes para o sistema água-vegetação-solo foram propostos ao modelo ArcEGMO na tentativa de adquirir boa eficiência entre a situação real e a desenvolvida matematicamente pela modelagem. As vazões totais nos rios tiveram suas dinâmicas analisadas diariamente e mensalmente. A discretização espacial foi determinada de acordo com o requerimento da acurácia dos resultados: cenários meteorológicos foram distribuídos em unidades elementares de área, a estrutura e concentração do fluxo foram discretizadas em zonas hidrotópicas (conjunto de unidades de área).

Pela baixa relação entre as estações meteorológicas localizadas dentro da área e o comportamento da vazão, fez-se necessário a busca de informações em 24 estações meteorológicas e 3 estações climatológicas de áreas vizinhas, que proporcionalmente aos seus raios de distância ao centro geográfico da área exerceram influência no cálculo do balanço hídrico. O número de estações influenciáveis pode ser controlado no modelo e aplicado para a modelagem da vazão total da bacia.

Modelagem da vazão total

No cálculo do balanço hídrico pelo ArcEGMO, para a mesma bacia, mas sob uma discretização temporal mensal, a evaporação potencial apresentou melhores resultados quando calculada pela equação de Penman, mesmo após testes com as equações de cálculo de evaporação pelas funções propostas por Turc/Ivanov e Haude (Pfützner et al, 1997), que até o presente momento vinham sendo aplicadas na região. A fórmula de Penman leva em consideração a velocidade dos ventos, enquanto as demais não.

As evaporações real e potencial exibiram uma correlação de 30%. Ao discutir a quantificação da influência da vegetação no balanço hídrico, foi estabelecida em 70% a função mínima de vegetação, ou seja, a esse valor atribuímos a taxa de interceptação vegetal.

Em Seebach uma eficiência negativa de 1% foi atribuída entre o fluxo total e o calculado pelo modelo. A correlação entre os valores reais e calculados também não foi satisfatória, em apenas 5%. O nível médio real de 0,10 m foi subestimado pela modelagem em apenas 0,06 m. Em Flarchheim o coeficiente de correlação foi determinado como 0,49 e a eficiência da modelagem em 49%, no entanto o modelo equiparou os valores real e calculado para a cota média. (Tabela 2).

As curvas da distribuição mensal da vazão total nas duas seções podem ser observadas nas figuras 5 e 6.

Tabela 2. Resultados da validação dos parâmetros hidrológicos no modelo ArcEGMO, para Seebach e Flarchheim numa distribuição mensal da vazão total.

	Nível médio (m)	Coefficiente de correlação	Eficiência
Seebach	0,10		
ArcEGMO	0,06	0,05	-0,01
Flarchheim	0,04		
ArcEGMO	0,04	0,49	0,49

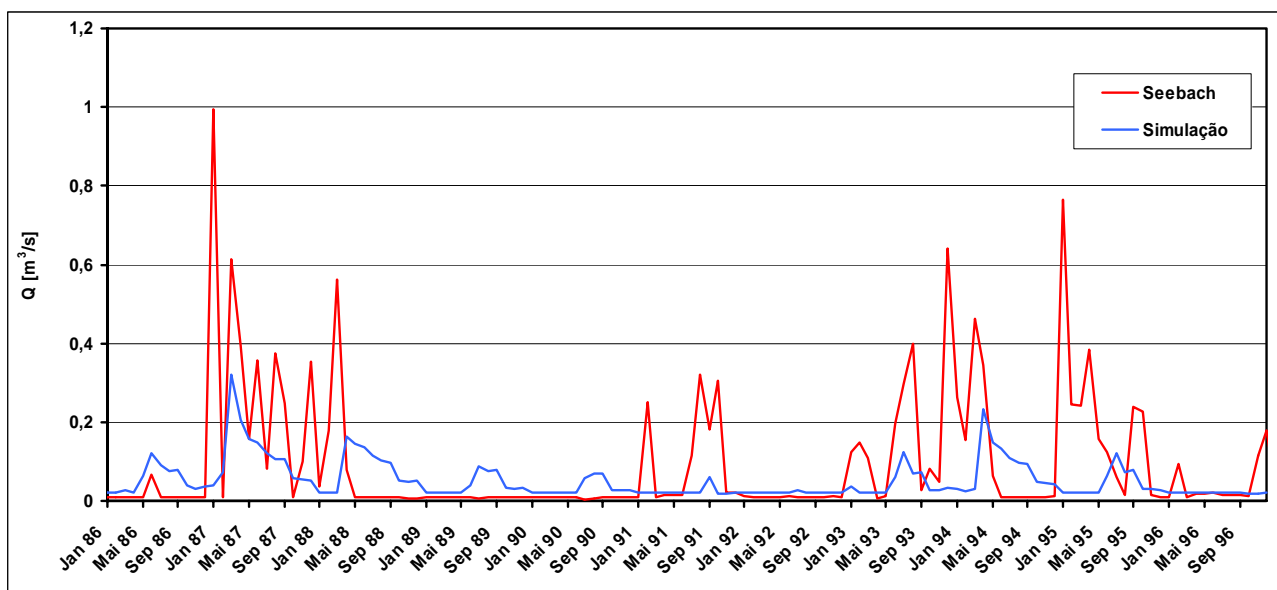


Figura 5. Gráfico ilustrativo da curva real de vazão e simulações pelo ArcEGMO para a seção Seebach, numa distribuição mensal (- Seebach; - Simulado).

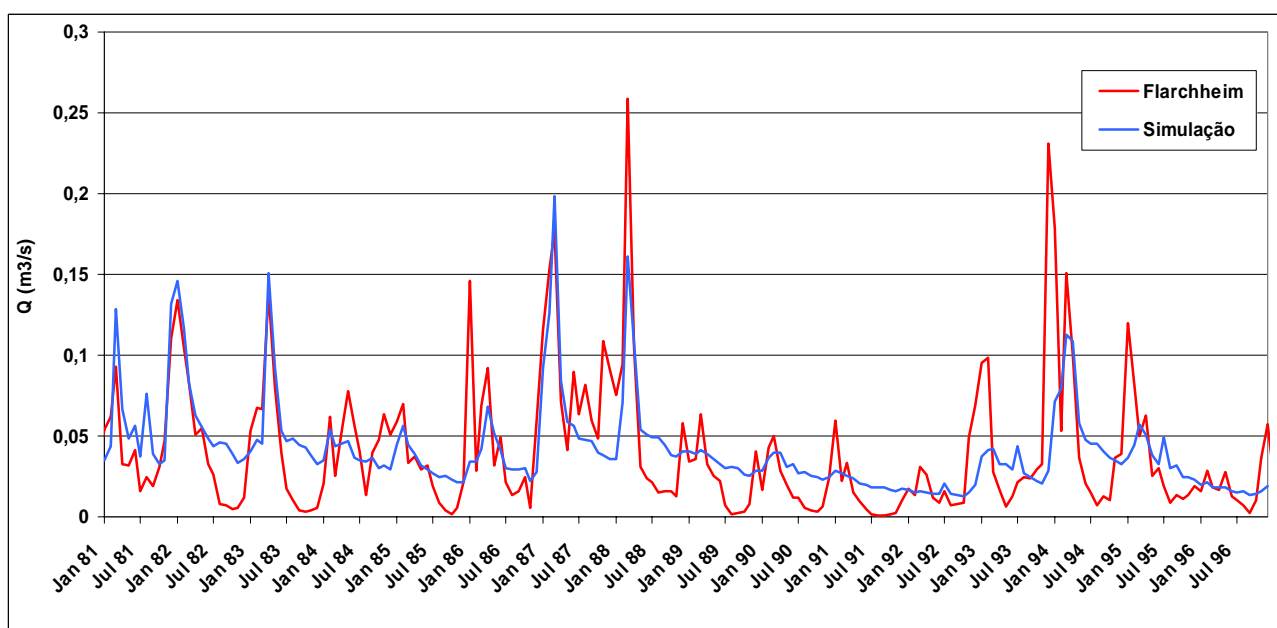


Figura 6. Gráfico ilustrativo da curva real de vazão e simulações pelo ArcEGMO para a seção Flarchheim, numa distribuição mensal (-Flarchheim; - Simulado).

Numa discretização temporal diária, o ArcEGMO apresentou melhores resultados quando a evaporação foi calculada pela equação de Penman, estabelecendo uma relação entre a evaporação real e potencial por um fator de 1,30. Ao discutir a influência da vegetação sobre o comportamento do escoamento, a função mínima da vegetação foi fixada em 70%. Os resultados do ArcEGMO foram em três diferentes simulações testadas, em seguida comparados a valores reais, segundo aplicação da metodologia descrita, para a validação dos parâmetros determinados. (tabela 3).

No cálculo do balanço hídrico diário, todas as 27 estações meteorológicas e climatológicas tiveram seus históricos usados como base de dados para entrada no modelo. O fato é explicado pela entrada tardia da precipitação no sistema na forma de neve, quando o derretimento ocorre num intervalo de tempo Δt diferente daquele em que ocorreu a precipitação. O mesmo não ocorre na análise mensal pela oportunidade da entrada total da neve no sistema no mesmo intervalo de tempo.

Para Seebach uma eficiência negativa de 8% foi obtida para o fluxo total. O nível médio de 0,10 m foi subestimado no cálculo em apenas 0,06 m e a correlação entre os valores foi consideravelmente nula. Em Flarchheim o nível médio foi atingido pelo modelo, a correlação entre as curvas é de 12% e o modelo apresentou uma eficiência de 1%.

As curvas de simulação podem ser observadas nas figuras 7 e 8.

Tabela 3. Resultados da validação dos parâmetros hidrológicos no modelo ArcEGMO, para Seebach e Flarchheim numa distribuição diária da vazão total.

	Nível médio (m)	Coefficiente de correlação	Eficiência
Seebach	0,10		
ArcEGMO	0,06	0,007	-0,08
Flarchheim	0,04		
ArcEGMO	0,04	0,12	0,01

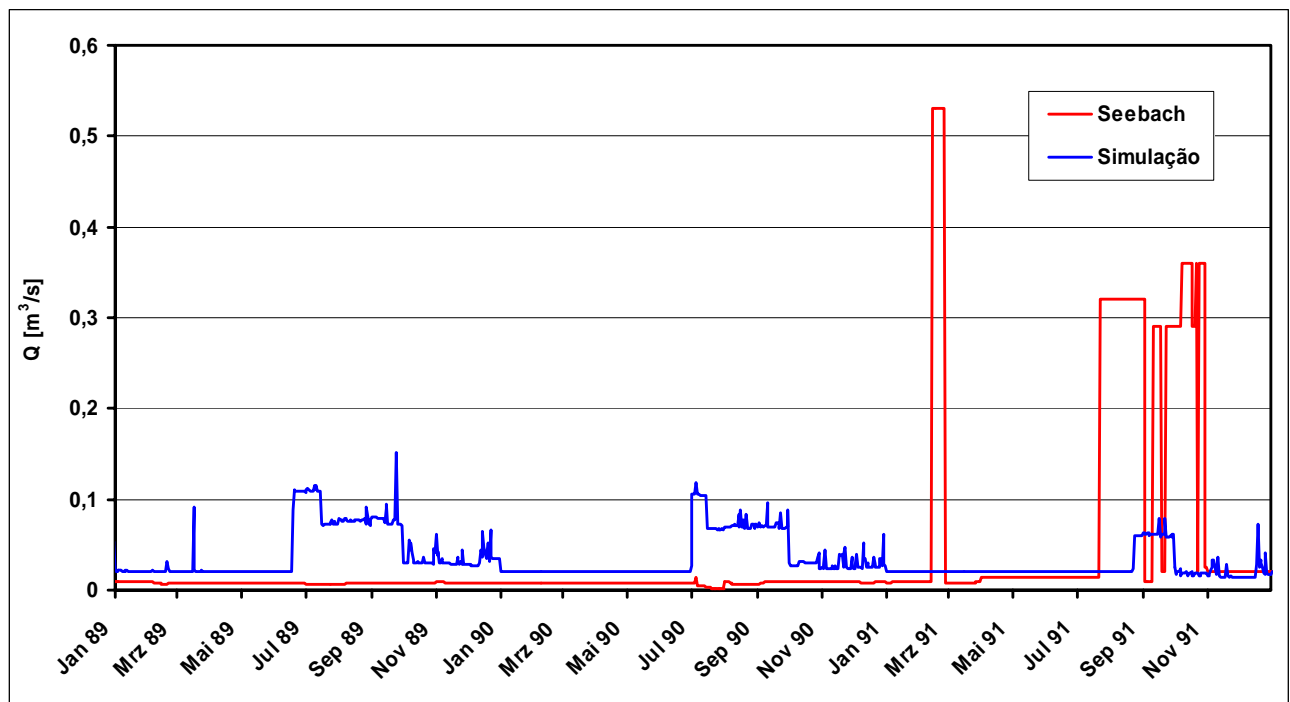


Figura 7. Gráfico ilustrativo da curva real de vazão e simulações pelo ArcEGMO para a seção Seebach, numa distribuição diária (- Seebach; - Simulado).

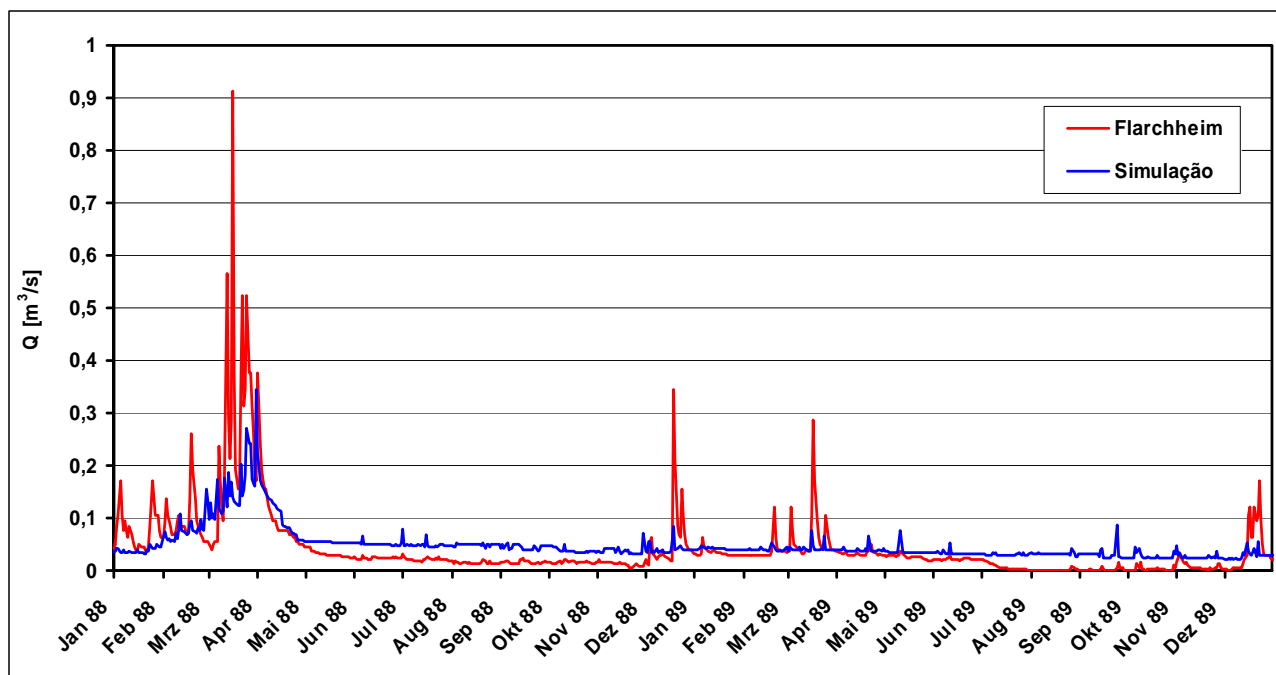


Figura 8. Gráfico ilustrativo da curva real de vazão e simulações pelo ArcEGMO para a seção Flarchheim, numa distribuição diária (-Flarchheim; - Simulado).

A baixa relação entre as simulações e o comportamento real leva-se a questionar a eficiência do modelo ArcEGMO. No entanto, estudos aplicados a áreas maiores (Pfützner, 2003), como é o caso da barragem de Nängelstedt localizada a jusante de Seebach, demonstra a eficácia do modelo matemático para essa bacia (figura 9). Coube buscar a explicação para a baixa eficiência na modelagem nas características da área, sendo justificada por sua geologia. É verificada uma alta contribuição do sistema fluvial para o lençol subterrâneo, onde o fluxo inverso não é registrado dentro dos limites da mesma bacia. Isso gera uma discussão da existência de um fluxo subterrâneo intermitente para bacias vizinhas como consequência da geologia local, sugerindo a modelagem individual das águas subterrâneas em estudos posteriores.

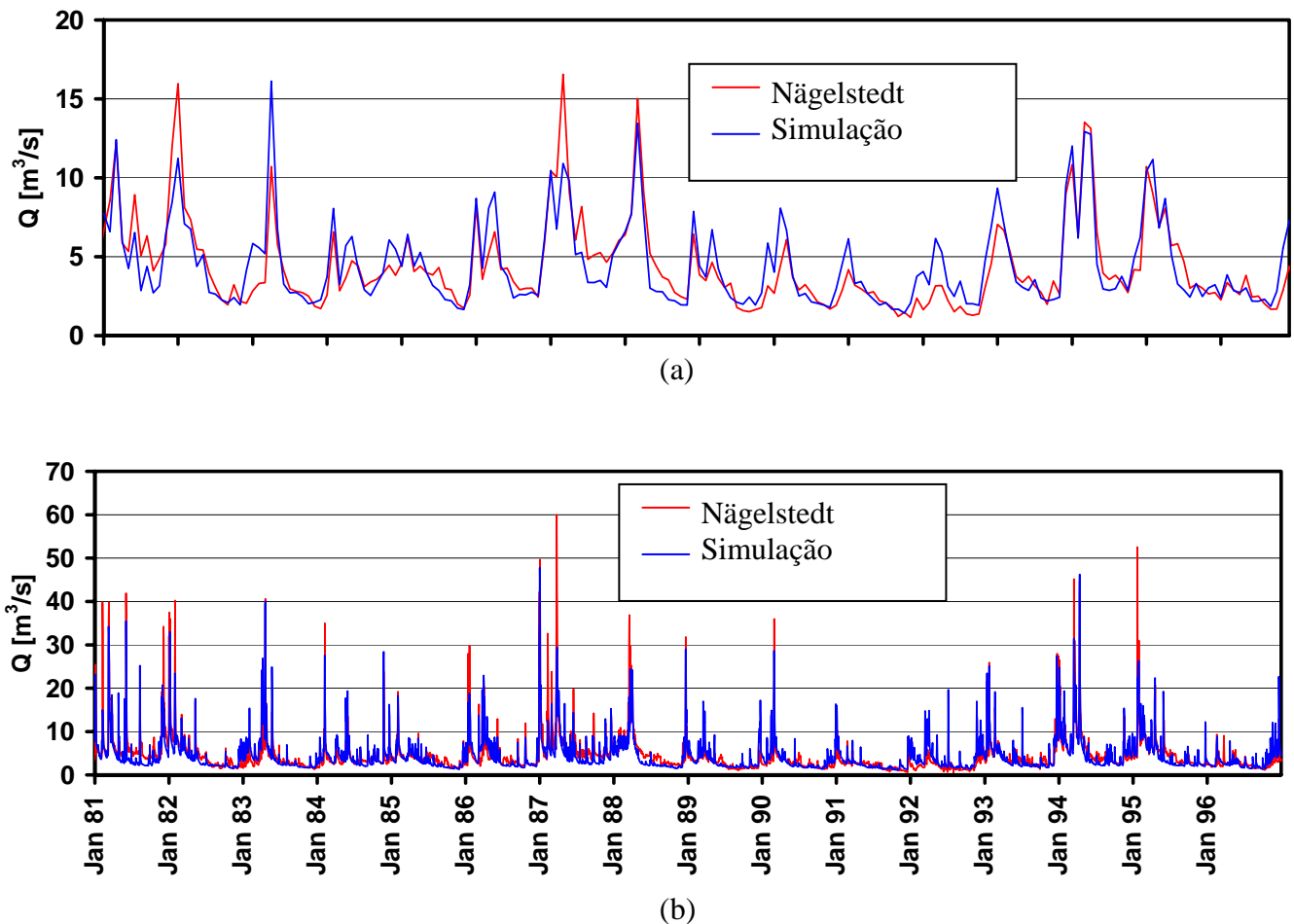


Figura 9. Vazões simuladas e reais para Nægelstedt usando o modelo ArcEGMO numa distribuição mensal (a) e diária (b) (Pfützner, 2003) (-Nægelstedt; - Simulado).

CONCLUSÕES

Quando analisada a eficiência do modelo ArcEGMO, questiona-se os resultados obtidos para Seebach, que sempre se apresentam insatisfatórios. A existência de falhas geológicas em toda a bacia e em especial na base da barragem pode explicar o comportamento em Flarchheim e Seebach. Quando feito o estudo geológico na área para a localização do reservatório, não era atribuída saída pelas falhas, sendo avaliado o contrário pelo modelo.

As características hidrogeológicas da área provocam uma independência do fluxo subterrâneo quando relacionado à vazão total. É verificada uma alta contribuição do sistema fluvial para o lençol subterrâneo não havendo fluxo no sentido inverso dentro dos limites da mesma bacia como consequência da geologia local, sugerindo a modelagem individual das águas subterrâneas em estudos posteriores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becker, A. *EGMO-Einzugsgebietsmodelle zur Abflußberechnung, -vorhersage und -simulation*, WWT 25, 9. Berlin, 1975.
- Lahmer, W. und Becker, A. *Auswirkung von Landnutzungsänderungen auf den Wasserhaushalt eines mesoskaligen Einzugsgebietes*. Beitrag zum 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar "Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe". Outubro de 1998 em Karlovy Vary (Karlsbad). B.G. Teubner Stuttgart. p. 315-318. Leipzig, 1998.
- Lahmer, W., Steidl, J., Dannowski, R., Pfützner, B., Schenk, R. *Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg*. Landesumweltsamt Brandenburg (Hrsg.). Studien und Tagungsberichte, Band 27, ISSN 0948-0838, Eigenverlag, Dez 2000. Potsdam, 2001.
- O'Donnell, T. Computer evaluation of catchment behaviour and parameters significant in flood hydrology, I.C.E. Symp., River Flood Hydrology. 1966 p.103 -113
- Pfützner, B. *Hydrologische Modelluntersuchungen im Einzugsgebiet der Unstrut*. Apresentação em Rahmen der Fachtagung "Wasser – Lebensnotwendige Ressource und Konfliktstoff". Fevereiro 2003. Erfurt, 2003.
- Pfützner, B., Lahmer, W., Becker, A., *ArcEGMO – Programmsystem zur GIS-gestützten hydrologischen Modellierung*. Kurzdokumentation. Berlin, 1997.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao PIK – Potsdam Institut für Klimafolgenforschung e ao BAH Berlin – Büro für Angewandte Hydrologie Berlin, pela disponibilização de dados e pelo uso do modelo; e ao programa Capes / UNIBRAL que possibilitou a parceria dos autores.