

A UTILIZAÇÃO DA MODELAGEM MATEMÁTICA ASSOCIADA AO SIG NO ESTUDO DO IMPACTO HIDROGEOLÓGICO DE RESERVATÓRIOS

Mancuso, M.A.^{1,2}; Azevedo, S.G.¹; Albuquerque Filho, J.L.¹; Pacheco, A.²; Schnoor, J.L.³

¹ IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo.

² Universidade de São Paulo

³ The University of Iowa

Abstract: The purpose of this work is to demonstrate the viability of using Geographic Information System (GIS) associated with mathematical models as a methodological option to be applied in the study of the modifications induced in the water table by dam reservoirs after their impoundment. The area was the basin of drainage of the Biritiba-Mirim river in São Paulo State (Brazil). This work was developed using the MAP and MODFLOW modules from Goundwater Modeling System (GMS) program, as a tool to elaborate the mathematical model, calibration, verification, reservoir impoundment simulation, prediction map of reservoir influence on water levels and aquifer monitoring program after the impoundment. According to the prediction map of influence, or final water table depth map, 17,7% of the study area will be on the high critical zone, 9,2% in the median and 73,0% in the low one. In conclusion, this work showed the viability of using GIS, associated to mathematical models to predict modifications induced in the water table levels after a reservoir impoundment.

Resumo: Este trabalho objetivou mostrar a viabilidade de utilização do Sistema de Informação Geográfica associado à modelagem matemática, como opção metodológica a ser aplicada no estudo das modificações induzidas no nível freático, após o enchimento de reservatórios. A área estudada foi a bacia de drenagem do rio Biritiba-Mirim, São Paulo (Brasil). O trabalho foi desenvolvido utilizando basicamente as ferramentas dos módulos *MAP* e *MODFLOW* do programa *GMS*, para a elaboração do modelo matemático, calibração, verificação, simulação do enchimento, elaboração do mapa previsional de influência do reservatório sobre o aquífero livre e proposta de monitoramento do aquífero após o enchimento. De acordo com o mapa previsional de influência, ou mapa de profundidade final do N.A., 17,7% da área estudada estará inserida na zona de alta criticidade, 9,2% na de criticidade média e 73,0% na de criticidade baixa. A execução do presente estudo comprovou a viabilidade da aplicação do Sistema de Informação Geográfica - SIG, associado à modelagem matemática com fins predictivos, em escala de bacia de contribuição, para a avaliação das modificações induzidas no nível do aquífero livre após o enchimento de reservatórios.

Keywords: groundwater modeling, GIS, lake, hidrogeologic impact.

INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir do aproveitamento do potencial hidrelétrico, por meio da instalação de grandes barragens, tornou-se corrente no Brasil a partir da década de 60. Atualmente, o país registra 2.200 usinas hidrelétricas, e o governo federal prevê a necessidade de construção de 434 novas barragens até o ano 2015 (Mello, 1999).

Segundo Albuquerque Filho et al. (1994), a importância dos estudos de impactos hidrogeológicos de enchimento de reservatórios, executados anteriormente à implantação da obra, está em possibilitar a prevenção, ou eventuais correções ou mitigações desses efeitos em áreas já ocupadas, propiciando uma ferramenta importante

para o planejamento e uso de áreas ainda não ocupadas.

A utilização de modelos matemáticos nos estudos de águas subterrâneas, de acordo com Anderson and Woessner (1992), é o melhor caminho para realizar previsões sobre as consequências de uma ação proposta. No entanto, a modelagem matemática requer um conhecimento mais detalhado do sistema a ser modelado, em relação a metodologias mais simples. Um dos principais desafios, no caso, é a transferência desse conhecimento para o modelo numérico.

Atualmente, o Sistema de Informação Geográfica permite a criação e organização de uma base de dados georeferenciados, e a utilização de técnicas recentes possibilitaram a transferência dessas informações para os modelos matemáticos.

A partir da aplicação desses dois instrumentos, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito das modificações induzidas no nível potenciométrico decorrentes do enchimento do reservatório de Biritiba-Mirim, SP, Brasil, propiciando um instrumento de planejamento do uso e ocupação de áreas no entorno do reservatório, na forma de mapa previsional de influência do enchimento.

METODOLOGIA

A metodologia utilizada teve como base as orientações de Anderson and Woessner, (1992), no que se refere ao processo de modelagem e de Albuquerque Filho (2002), no que se refere ao método de estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios.

O trabalho foi orientado, de acordo com as etapas descritas a seguir:

- **Desenvolvimento do modelo conceitual:** envolveu a identificação das unidades hidrogeológicas, condições de contorno do sistema. Foram coletadas informações sobre balanço hídrico e dados de campo para a definição de estresses hidrológicos e dos parâmetros de entrada do modelo. Os trabalhos foram iniciados com a pesquisa bibliográfica, seguida de trabalhos de campo, que envolveram o cadastro de captações de água subterrânea e nascentes, e a execução de sondagens necessárias para complementar informações sobre o aquífero nas áreas de interesse. A pesquisa contou com o levantamento das seguintes informações básicas: caracterização geral da área, geologia, geomorfologia, hidrogeologia (que inclui o levantamento de informações referentes às captações de águas subterrâneas), climatologia e uso e ocupação do solo.
- **Seleção do modelo matemático:** foi utilizado para a simulação dos fluxos subterrâneos o programa tridimensional modular *MODFLOW* elaborado por McDonald and Harbaugh (1988);
- **Transferência do modelo conceitual para o Sistema de Informações Geográficas (SIG):** o modelo conceitual foi adaptado de forma a ser interpretado pelo programa. O processo envolveu a definição das condições de contorno e elaboração de mapas temáticos dos parâmetros do aquífero e estresses hidrológicos. As informações foram transferidas para o *SIG*, utilizando o módulo *MAP*, da interface *Groundwater Modelling System – GMS* (ECGL, 1996), que permite definir o modelo conceitual

em *SIG*, através da criação das seguintes coberturas: atributos aéreos, fontes/sumidouros locais e atributos das camadas.

- **Transferência da informações para o programa MODFLOW:** Uma vez transferidas as informações para o *SIG*, foi definida a malha da área a ser modelada, com a ativação das células internas da cobertura ativa. As informações foram, então transferidas para os respectivos módulos do programa *MODFLOW*, por meio da interface *GMS* (ECGL, 1996). No caso dos atributos da cobertura fontes/sumidouros, o cálculo da condutância dos cursos d'água superficiais, o módulo *MAP*, permite aplicar o valor de condutância por unidade de comprimento (L) para o arco que representa o rio ou córrego. Quando o programa transfere estas informações para a malha, multiplica automaticamente esse valor pelo comprimento do arco que intersecta a célula, inserindo assim, a condutância real do segmento. Os valores dos parâmetros aplicados aos nós (ex. cota do leito do rio e seu nível d'água), são interpolados ao longo do arco (média linear), sendo designado para cada célula o valor obtido na metade do segmento intersectado. No caso dos parâmetros aéreos como a recarga e a evapotranspiração, o centro de cada célula é comparado com o polígono no qual se encontra sobreposta, adquirindo então o atributo do mesmo. Quando uma única célula se sobrepõe a mais de um polígono, o valor designado para a mesma é resultante da agregação do atributo definido para cada um desses polígonos. Nos parâmetros designados às camadas do sistema aquíferas (ex. transmissividade), o centro de cada célula é comparado com o polígono no qual se encontra sobreposta, adquirindo então o atributo do mesmo. Uma vez especificada a transmissividade para cada bloco, o programa utiliza a média harmônica para calcular a transmissividade entre os nós.
- **Calibração do modelo:** foi realizada a calibração do modelo com o objetivo de reproduzir os dados de nível d'água e fluxos observados em campo. Nesse processo efetuaram-se ajustes nos parâmetros iniciais do modelo por meio do processo descrito na **Figura 1**. Foram considerados resultados satisfatórios quando a relação entre as cargas hidráulicas do modelo calibrado e as observadas em campo apresentou erro médio absoluto (*MAE*) igual ou inferior a 1,0 m, e resíduo total igual ou inferior a 5%.

- **1ª Simulação do enchimento do reservatório:** com o objetivo de caracterizar os possíveis reflexos sobre o aquífero freático, foi realizada a simulação do enchimento do reservatório em condição de estabilidade final do sistema, adotando-se como condição inicial para efeitos de simulação, as cargas hidráulicas resultantes da calibração. A simulação, em caráter conservador, admite o enchimento instantâneo do reservatório na sua cota de elevação máxima. O corpo d'água foi desenhado em SIG, utilizando o módulo MAP

da interface *Groundwater Modeling System – GMS* (ECGL, 1996), sob a base conceitual previamente calibrada, considerando cargas hidráulicas constantes em toda a sua superfície. Uma vez inserido o lago no sistema, os dados foram transferidos para o módulo MODFLOW, por meio do *GMS*. O programa então simulou os níveis potenciométricos finais previstos para a área, a partir desses resultados, foram definidos os locais para instalação dos poços para o monitoramento das cargas hidráulicas.

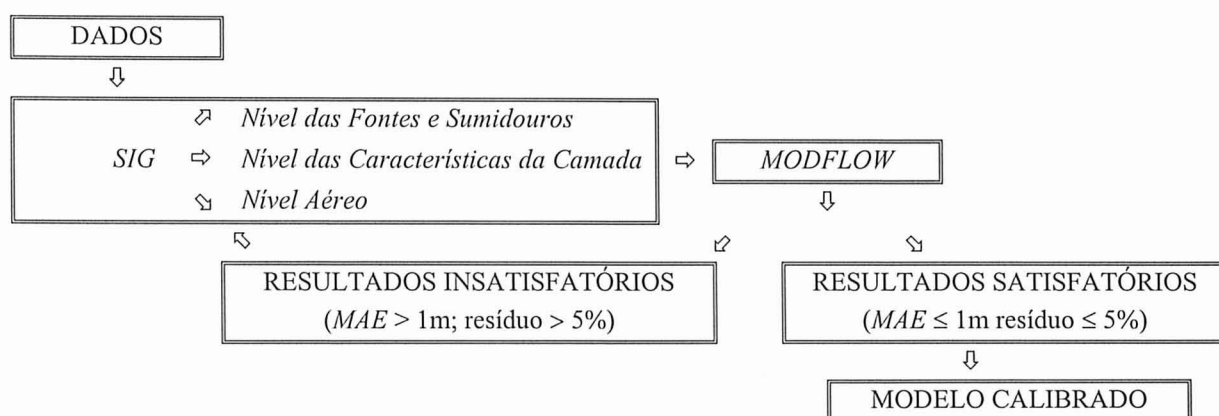


Figura 1 – Roteiro utilizado para a calibração do modelo matemático.

- **Verificação do modelo:** Concluída a simulação do enchimento do lago, foram instalados os poços de monitoramento nas áreas destacadas, sendo executados testes hidrogeológicos adicionais como o objetivo de complementar as informações existentes, e visando a verificação do modelo. Foi realizado o monitoramento dos poços instalados e daqueles previamente cadastrados, durante um ano antes do enchimento do reservatório, para conhecer o funcionamento o sistema hidrogeológico antes do enchimento do lago. O processo de verificação foi realizado em estado transiente, de acordo com o período de interesse. Um dos parâmetros calibrado durante este processo foi o coeficiente de armazenamento, que é utilizado na definição do período de monitoramento posterior ao enchimento.
- **2ª Simulação do enchimento do reservatório:** o modelo foi ajustado de acordo com os resultados da verificação, sendo então repetido o procedimento da 1ª simulação do enchimento do lago. Com o modelo calibrado e a simulação concluída foi elaborado o mapa previsional do enchimento do reservatório.
- **Elaboração do mapa previsional do enchimento do reservatório:** A partir das cargas hidráulicas resultantes da simulação do enchimento do reservatório e do mapa topográfico da área, foi possível elaborar o mapa de profundidade final do nível d'água subterrânea e delimitar duas zonas de influência e uma zona sem influência do reservatório: ZONA A, que corresponde à zona onde a profundidade final prevista para a água subterrânea, estará situada entre 0 e 5 m; ZONA B, cujos níveis serão superiores a 5,0 m; ZONA C, que corresponde à área nos entornos dos reservatórios onde o nível d'água subterrânea não deverá sofrer nenhuma influência do enchimento dos lagos. A avaliação deste resultado, associada ao estudo do uso e ocupação do solo, resultou na identificação das áreas a serem mantidas sob observação durante e após o enchimento do reservatório.
- **Proposta de monitoramento do aquífero:** a partir da simulação do enchimento do reservatório, e dos parâmetros calibrados durante a verificação do modelo, foi simulada a resposta do aquífero livre em determinados períodos de

tempo, após o fechamento da barragem. Essa simulação permitiu definir o programa de monitoramento do nível potenciométrico, a ser executado após o enchimento do reservatório, que teria por objetivo acompanhar as elevações da superfície potenciométrica induzidas pelo enchimento, e efetuar retroanálise das previsões efetuadas.

RESULTADOS

A área de estudo situa-se no extremo leste da bacia do Alto Tietê, é a bacia de drenagem do rio Biritiba-Mirim, afluente da margem esquerda do rio Tietê, que constitui divisa entre os municípios de Mogi das Cruzes e Biritiba-Mirim (SP, Brasil), de aproximadamente 75 Km².

Descrevem-se a seguir, os resultados obtidos nas diversas etapas de trabalho propostas nesta metodologia.

Elaboração do modelo conceitual

Foram seguidas três etapas na construção do modelo conceitual da bacia de drenagem do rio Biritiba-Mirim:

- 1) Definição das unidades hidrogeológicas;
- 2) Definição do sistema de fluxo;
- 3) Preparação do balanço hídrico.

A partir do estudo da geologia, geomorfologia e hidrogeologia regional foram diferenciados dois tipos de unidades aquíferas na região estudada:

- 1) o Sistema Aquífero Sedimentar (SAS), que se estende ao longo das drenagens principais, sendo constituídos predominantemente por camadas argilosas ricas em material orgânico, intercaladas ao material detrítico grosseiro predominantemente, com espessura média de 7 m; e
- 2) o Sistema Aquífero Cristalino (SAC), no qual podem ser distinguidas duas unidades:
 - a) a unidade inalterada (ou fresca), cuja água escoar somente nas descontinuidades rúpteis da rocha, que é o aquífero cristalino propriamente dito, de caráter livre a semi-confinado e heterogêneo e anisotrópico e está localizado a profundidades de 120-150 m (DAEE, 1975). Esta unidade apresenta transmissividade média de 3,5 m²/d, e uma porosidade eficaz (Sy) média de 3% (Sabesp-Cepas, 1994).
 - b) a unidade alterada, onde o escoamento ocorre nos interstícios da rocha

intemperizada, a espessura média desta unidade heterogênea, de porosidade granular, é de 50 m (Hirata e Ferreira, 2001). Estudos realizados por Cavalcante, (1990) indicaram uma condutividade hidráulica entre $8,64 \times 10^{-1}$ e $8,64 \times 10^{-3}$ m/d e confirmaram interação da unidade alterada com o meio fraturado.

Nas rochas cristalinas da região, as condições de relevo e de cobertura do solo propiciam a formação de um aquífero contínuo localizado na camada intemperizada. A recarga natural alimenta as falhas e fraturas do maciço rochoso subjacente sendo armazenada e escoando em direção aos rios e riachos próximos. Existe, portanto, ampla ligação hidráulica entre as camadas transmissoras, capaz de influir numa extensa área.

O padrão das curvas potenciométricas indica fluxos locais em direção às drenagens que descem pelas encostas da bacia, e regionalmente as águas subterrâneas fluem na direção do rio Biritiba-Mirim. Na planície de inundação, ao longo do rio Biritiba-Mirim, observam-se gradientes suaves, em torno de 10^{-2} m/m, enquanto que os gradientes mais abruptos são observados ao longo das encostas, com valores em torno de 10^{-1} m/m.

Para o cálculo do balanço hídrico da área foi utilizada a equação sugerida por Tucci (1993), sendo obtida uma taxa de escoamento subterrâneo de 0,0014 m/d devida à precipitação (recarga natural). No entanto, no trabalho de avaliação hidráulica dos sistemas de irrigação por aspersão convencional, realizado na região do Alto Tietê, Saad *et al.* (2000) constataram que a prática agrícola representa uma recarga média artificial de 0,0304 m/d nos meses de déficit hídrico. Considerando-se que 41% das terras da bacia de drenagem do rio Biritiba-Mirim apresentam ocupação rural densa e, a partir do balanço hídrico edafológico proposto por Thornthwaite e Mather (Saad *et al.*, 2000), estimou-se para o sistema aquífero da região uma recarga mínima aproximada de 0,00485 m/d.

No que se refere à evapotranspiração, de acordo com o balanço hídrico edafológico, na região do município de Mogi das Cruzes, a evapotranspiração real (ETR) foi estimada em 0.0031 m/d aproximadamente.

Elaboração do modelo numérico

Do ponto de vista das dimensões espaciais, o modelo utilizado foi um modelo bidimensional aéreo, que assume o ponto de vista do aquífero. Neste caso, a transmissividade e o armazenamento

foram especificados para cada célula. O aquífero, isotrópico e heterogêneo, estaria sujeito à recarga através da infiltração de águas meteóricas e da irrigação, à influência do sistema de drenagem das águas superficiais, e à descarga através da evapotranspiração atuando a profundidades de até 1 m.

As condições de fluxo obtidas permitiram a seguinte representação matemática das condições de contorno da bacia:

- 1) limite hidráulico, com fluxo específico (nulo) nas células de contorno, representando os divisores d'água da bacia;
- 2) limite físico, com nível d'água específico nas células do rio Biritiba-Mirim, representando o nível d'água do rio.

A área, selecionada de acordo com o divisor d'água regional, foi dividida em uma malha constituída por 120 linhas e 104 colunas, com células de 100 m na direção x e 100 m na direção y . O espaçamento na direção z foi especificado indiretamente, através do valor da transmissividade,

A transferência das informações do módulo *MAP* para o *MODFLOW* permitiu recortar a malha de forma a acompanhar o contorno irregular da bacia de drenagem, minimizando assim, o número de nós inativos, reduzindo as células ativas a um total de 7.246, resultando numa superfície total modelada de 72,46 km².

Calibração do modelo matemático

A obtenção dos parâmetros do modelo que possibilitaram a calibração, ocorreu através do ajuste manual dos parâmetros e estresses que afetam o aquífero, pelo processo de ajuste por tentativas e erros.

Descrevem-se, a seguir, os valores finais utilizados para a calibração do modelo:

- 1) Rio Biritiba-Mirim: o rio Biritiba-Mirim foi representado como limite de fluxo dependente do nível potenciométrico, e apresentou condutância final de 5 L (m), sendo este valor atribuído no módulo *MAP*, aos arcos que representam o curso d'água. A profundidade da lâmina d'água do rio Biritiba-Mirim, foi definida entre 0,7 e 0,8 L (m), com as profundidades maiores ocorrendo na área de descarga da bacia. A cota de elevação do leito do rio foi obtida a partir da base topográfica;
- 2) Afluentes do rio Biritiba-Mirim: os córregos foram representados como drenos, e assumida uma condutância final variável de 1 a 3 L (m),

com ocorrência de valores mais elevados nas áreas de baixada. A cota de elevação do dreno foi definida a partir da base topográfica;

- 3) Evapotranspiração: foi utilizado o valor uniforme de $1,9 \cdot 10^{-3}$ m/d, com profundidade limite do efeito da evapotranspiração de 1 m. Os valores de elevação foram obtidos com utilização da base topográfica para a definição de zonas de igual altitude, sendo estas obtidas a partir das seguintes curvas de nível: 750 m, 755 m, 775 m, 800 m, 850 m e 900 m; este parâmetro não foi modificado durante a calibração;
- 4) Recarga: para este parâmetro foi utilizado o valor uniforme de 0,0055 m/d;
- 5) Transmissividade: os valores de transmissividade apresentaram variação de 1 a 4 m²/d nas áreas de Colinas, Morrotes, Morrotes Paralelos, Morros, Serras e Montanhas, e 10 a 50 m²/d nas planícies fluviais que circundam esta região;
- 6) Reservatórios Superficiais (lagos, açudes, etc.): quando indicado, estes reservatórios foram considerados corpos d'água com nível potenciométrico específico, cujo valor depende da cota topográfica na qual se encontram inseridos;
- 7) Condição Inicial do Sistema: no processo de calibração as informações foram processadas em regime permanente, ou seja, sem considerar o fator tempo. Determinou-se o valor arbitrário de 720 m como nível potenciométrico inicial, assumindo-se que o efeito da condição inicial não exerce influência na solução.

Para a obtenção do valor da carga hidráulica calculada pelo modelo, o mapa potenciométrico resultante do módulo *MODFLOW*, foi transferido para o módulo *TIN - Triangulated Irregular Network*, do programa *Groundwater Modelling System - GMS* (ECGL, 1996), que permite a interpolação linear dos valores obtidos para cada nó, através da triangulação. Uma vez concluída esta etapa, os níveis potenciométricos observados em campo, nos poços cadastrados, foram comparados com os obtidos no modelo calibrado.

A superposição do mapa desenhado em *AutoCAD*, com o resultado obtido pelo *TIN*, permitiu a comparação dos dados na localização precisa do poço. A análise estatística desta relação indicou um erro médio (*ME*) de -0,5 m, um erro médio absoluto (*MAE*) de 0,7 m e média da raiz quadrada do erro (*RMS*) de 1,5. O percentagem de resíduo foi de 2,3%.

O balanço hídrico final indicou que o volume de água que entra e o volume que sai do sistema modelado é praticamente o mesmo, com discrepância de apenas -0,30%.

Simulação do enchimento do reservatório

A simulação do enchimento do reservatório de Biritiba-Mirim também foi realizada em condição de fluxo permanente, permitindo avaliar os níveis potenciométricos finais, resultantes após o sistema atingir o equilíbrio. Todos os parâmetros foram mantidos de acordo com o modelo inicial, a exceção do lago, que foi acrescentado e teve seus limites ajustados durante a simulação, e da condição inicial do sistema, onde foram utilizados os níveis potenciométricos resultantes da calibração.

O lago, desenhado em SIG por meio do módulo *MAP*, foi posteriormente transferido para o *MODFLOW*. O reservatório foi simulado utilizando células com níveis potenciométricos específicos, tanto ao longo da curva de enchimento, de 757,5 m (arcos), quanto no seu interior (polígono).

Nos casos em que a curva potenciométrica de 757,5 m não coincidia com a borda do lago, devido ao espaçamento da malha (100 m x 100 m), foi modificado o nível potenciométrico específico das células adjacentes, de forma a ajustar a curva potenciométrica 757,5 m com a curva de enchimento (topográfica). Em alguns casos foram modificadas as características das células, de nível potenciométrico específico para variável ou vice-versa, conforme a necessidade. O ajuste ocorreu através do processo de tentativas e erros dentro do módulo *MODFLOW*. Uma vez atingido o objetivo, a simulação foi dada por concluída.

A amplitude de elevação do nível de descarga de base do sistema no eixo da barragem é de aproximadamente 18 m, distribuídos numa extensão aproximada de 12 km ao longo do rio Biritiba-Mirim.

De acordo com o mapa potenciométrico resultante da simulação, as áreas onde os níveis das águas subterrâneas sofrerão maior influência do reservatório encontram-se restritas às margens do lago, concentrando-se basicamente na primeira metade e diminuindo no sentido contrário à barragem.

É visível também que a influência diminui nas proximidades das drenagens, que funcionam como locais de descarga do aquífero na cota topográfica especificada. Nestes pontos, o aquífero não sofrerá alterações significativas em relação à sua configuração inicial, fazendo com que a direção do fluxo também não seja significativamente alterada.

Verificação do modelo

Esta fase inclui a coleta de dados e informações necessárias para executar a verificação do modelo e monitorar o aquífero antes do enchimento do reservatório.

Uma vez concluída a simulação do enchimento do lago, foram locados e instalados treze poços de monitoramento, visando a sua utilização como controle da extensão real da área de influência do reservatório.

Com a finalidade de verificar o coeficiente de permeabilidade do aquífero foram executados testes de permeabilidade em 04 poços de monitoramento, os resultados indicaram que a permeabilidade varia de $1,87 \times 10^{-4}$ a $3,83 \times 10^{-3}$ cm/s, com média de $1,56 \times 10^{-3}$ cm/s (0,604 m/d). Além disso, foi realizado o monitoramento do nível potenciométrico durante o período de um ano, prévio ao enchimento do reservatório, nos meses de maio/junho/2000, setembro/2000, dezembro/2000 e março/2001.

O modelo, inicialmente calibrado, foi submetido ao processo de verificação, no qual foram simulados, em estado transiente, níveis potenciométricos médios do mês de dezembro de 2000. O procedimento envolveu a calibração do modelo em situação de fluxo transitório, e a conseqüente determinação do coeficiente de armazenamento do aquífero. Os parâmetros do modelo calibrado foram mantidos, a exceção da recarga e evapotranspiração, que foram calculados para o período modelado.

A verificação foi considerada satisfatória com a utilização de um coeficiente de armazenamento variável de 1 a 7%. No caso, a análise estatística da relação entre a carga hidráulica observada em campo e a resultante da simulação indicou um erro médio (*ME*) de 0,48 m, um erro médio absoluto (*MAE*) de 2,5 m e desvio padrão (*RMS*) de 3,4 m.

Elaboração do mapa previsional do enchimento do reservatório

A partir da verificação do modelo, deu-se por concluída a fase de ajuste do modelo matemático, elaborado para a bacia de drenagem do rio Biritiba-Mirim. As informações foram, então, transferidas para o modelo de simulação final do enchimento, repetindo as etapas anteriormente descritas para a 1ª simulação do enchimento.

O mapa previsional de influência apresentou as seguintes características (**Figura 2**):

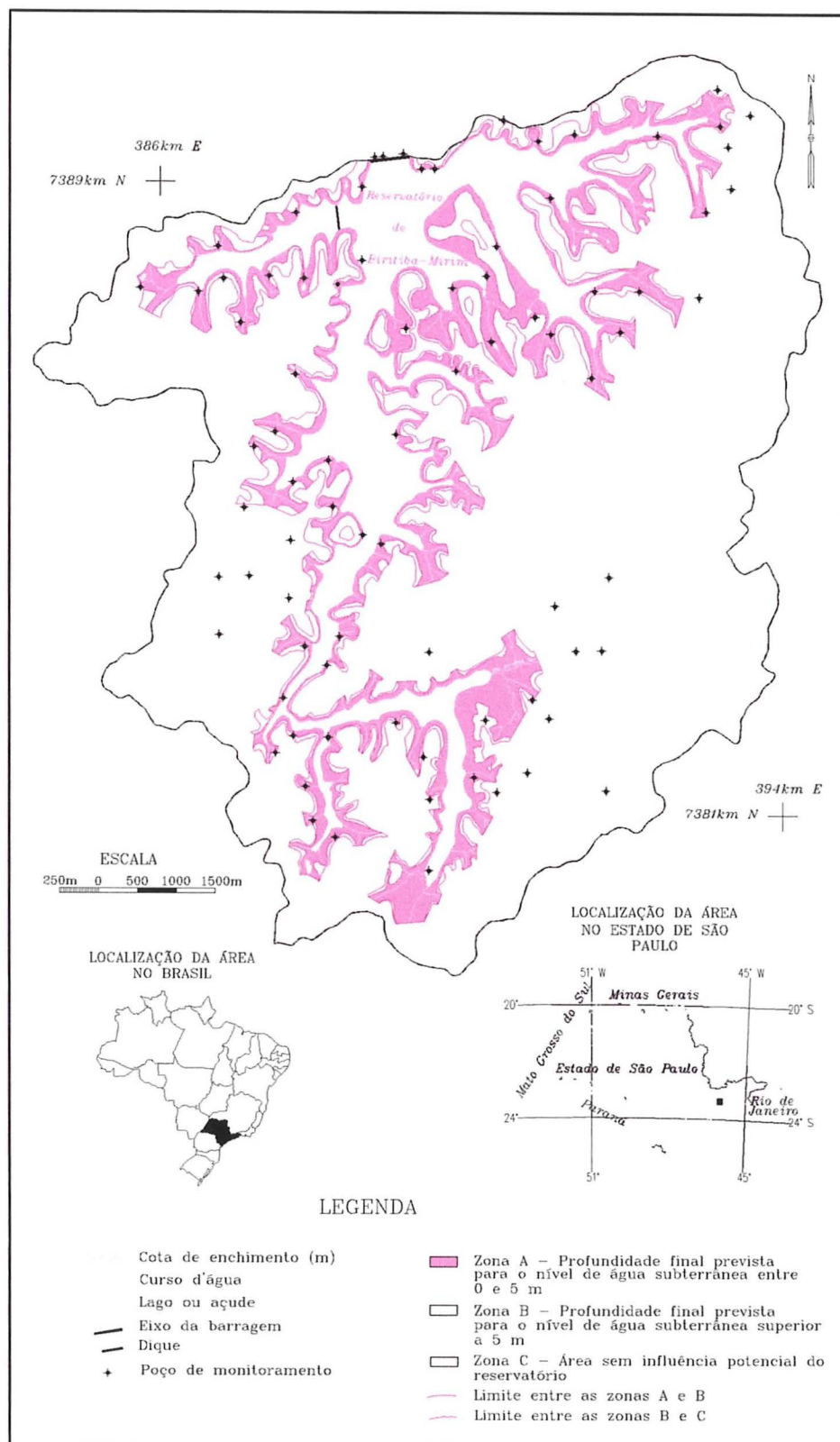


Figura 2 – Mapa previsual da influência do enchimento do reservatório de Biritiba-Mirim (SP, Brasil), no aquífero livre.

ZONA A – compreendeu uma faixa contínua de largura variável entre 10 e 360 m a partir da borda do reservatório (cota aproximada 757,5 m), ao longo das encostas do vale do rio Biritiba-Mirim e acompanhando as reentrâncias do lago. Apresentou expressão superficial relativamente restrita, perfazendo 11,2 km², que equivalem a 17,7 % da área estudada.

ZONA B – delimitada a partir da Zona A, constituiu uma faixa de largura variável entre 8 e 260 m ao longo das margens do reservatório em toda a sua extensão, ocupando as posições de encosta e topos de divisores de águas superficiais e sendo freqüentemente interceptada pelas reentrâncias da Zona A, ao longo dos cursos d'água tributários do rio Biritiba-Mirim. Apresentou expressão superficial menos significativa que a Zona A, correspondendo a 5,8 km², ou 9,2 % da área estudada, isto em função da própria topografia que se apresenta muito acidentada, o que favorece a atenuação do efeito do enchimento do reservatório nas suas margens.

ZONA C – ocupou as porções externas da área estudada, numa faixa que se estende no sentido

leste-oeste a partir da Zona B, compreendendo indistintamente fundos de vales, encostas e topos de divisores de água superficiais. Constituiu uma faixa quase contínua de largura entre 11 e 6.600 m, com algumas interrupções nas áreas a montante e nos vales de algumas drenagens. Apresentou expressão superficial significativa, correspondendo a 46,2 km², que equivalem a 73,0 % da área estudada.

Os prováveis efeitos da variação da profundidade do nível de água do aquífero em cada uma dessas zonas, encontram-se descritos no **Quadro 1**.

Programa de monitoramento do reservatório de Biritiba-Mirim

Uma vez que estes estudos foram desenvolvidos em situação anterior ao início do enchimento, foi elaborado um programa de monitoramento potenciométrico do sistema aquífero para execução em situação posterior ao enchimento do lago.

Influência potencial	Intervalo de profundidade do N.A. previsto (m)	Principais repercussões no uso e ocupação do solo		Alterações no aquífero livre
		Positivas	Negativas	
ALTA	0 - 5	P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7	N1, N2, N3, N4, N5, N6, N7, N8	- Afloramento do aquífero livre particularmente em zonas topograficamente deprimidas - Aumento da espessura saturada do aquífero - Aporte de volumes de água de características físico-químicas diferentes - Diminuição dos gradientes hidráulicos subterrâneos - Diminuição do escoamento subterrâneo - Aumento da vulnerabilidade à contaminação - Colapsos no solo
MÉDIA	5 - 10	P1, P2, P3, P4, P7	N1, N3, N7	
BAIXA	> 10	P1, P2, P7	N1, N7	
Relação das possíveis repercussões				
Negativas (N)			Positivas (P)	
N1 - Perda de pontos de captação instalados N2 - Perda de produtividade de solos agricultáveis N3 - Restrição de usos da água subterrânea N4 - Recalque de fundações e danos em edificações N5 - Recalque diferencial em subleito de vias N6 - Proliferação de freatófitas N7 - Geração, reativação ou aceleração de processos erosivos lineares N8 - Instabilização de taludes marginais ao reservatório			P1 - Aumento das reservas de águas subterrâneas P2 - Maior facilidade de acesso aos recursos hídricos subterrâneos P3 - Melhoria da umidade subsuperficial dos solos P4 - Melhoria no desenvolvimento de árvores que demandam muita água P5 - Perenização de cursos de água anteriormente intermitentes P6 - Formação de lagos em zonas topograficamente deprimidas P7 - Melhoria do padrão de qualidade das águas	

Quadro 1 - Possíveis efeitos no meio físico decorrentes da elevação induzida no nível freático da bacia de Biritiba-Mirim (adaptado de Albuquerque Filho, 2002).

A partir dos parâmetros e cargas hidráulicas resultantes do modelo verificado, foram simulados os níveis potenciométricos para 30 dias e 1 ano após o enchimento instantâneo do reservatório, a fim de avaliar o tempo e tipo de resposta do aquífero ao enchimento do lago.

A partir dos resultados obtidos com a simulação, foi elaborado o plano de monitoramento do nível potenciométrico. De acordo com o mesmo, as medições do nível d'água deverão ser efetuadas nos poços pertencentes à rede de monitoramento, durante o período de um ano após o fechamento do lago, mensalmente até os três primeiros meses após o enchimento e, a partir daí, com periodicidade trimestral.

CONCLUSÃO

A utilização da modelagem matemática associada ao Sistema de Informações Geográficas – SIG, representa um instrumento fundamental no prognóstico do impacto hidrogeológico de reservatórios. O processo permite maior precisão no cálculo das áreas de influência. A entrada de dados em SIG facilita a calibração do modelo e a saída de resultados também em SIG viabiliza o cruzamento das informações hidrogeológicas com as de ocupação e uso do solo.

A execução do presente estudo comprovou a viabilidade da aplicação do Sistema de Informação Geográfica - SIG, associado à modelagem matemática com finalidade de previsão, em escala de bacia de contribuição, para a avaliação das modificações induzidas no nível potenciométrico após o enchimento de reservatórios.

A utilização do GIS e da modelagem matemática como ferramentas no estudo desses impactos hidrogeológicos, possibilitou:

- 1) determinar as áreas mais suscetíveis à influência hidrogeológica do reservatório;
- 2) elaborar o mapa previsional de influência do reservatório, propiciando um instrumento de planejamento do uso e ocupação do solo;
- 3) definir o plano de monitoramento hidrogeológico adequado para o reservatório estudado.

A modelagem matemática em nível de bacia de contribuição, constitui-se numa ferramenta importante para a determinação das áreas que deverão ser detalhadas. A elaboração de um banco de dados georeferenciados, contendo as informações do modelo calibrado, possibilita a transferência direta dessas informações para um modelo matemático mais detalhado.

Agradecimentos: Departamento de Águas e Energia Elétrica–DAEE, por permitir a utilização dos dados para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque Filho JL, Bottura JA; Junior TB, Corrêa WAG. 1994. Avaliação de impactos hidrogeológicos como subsídio à instalação de reservatórios hidrelétricos no estado de São Paulo. In: Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 8. Recife, PE. p.169-179.
- Albuquerque Filho JL. 2002. Previsão e análise da elevação do lençol freático no processo de avaliação de impacto ambiental (AIA) de reservatórios hidrelétricos. PhD dissert., Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- Anderson MP, and Woessner WW. 1992. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press. 381p.
- Cavalcante NI. 1990. *Estudo hidrogeológico de terreno cristalino com manto de intemperismo – Área piloto de Atibaia (SP)*. Master dissert, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Departamento de Águas e Energia Elétrica–DAEE. 1975. *Estudo de águas subterrâneas. Região administrativa I. Grande São Paulo*. São Paulo, 1.
- Engineering Computer Graphics Laboratory-ECGL. 1996. *Groundwater Modeling System-GMS*. Versão 2.0. 1 CD Room.
- Hirata R, e Ferreira L. 2001. Os aquíferos da bacia hidrográfica do Alto Tietê: disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à poluição. V.31 *Revista Brasileira de Geociências* – Revista da Sociedade Brasileira de Geologia, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 43-50.
- McDonald MG, and Harbaugh AW. 1988. *Modflow–A modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model*. U.S.G.S.
- Mello S. 1999. O Sofisma da energia elétrica. *Saneamento Ambiental*, 59, jul/ago.
- Saad AM, Stefani FL, Agena SS, Azevedo SG, Hallmeister Jr.Z, Silva LAP, Canil K, Almeida MCJ, Cavani AC. 2000. *Subsídios do meio físico para o planejamento do desenvolvimento da irrigação na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (BH-AT)*. São Paulo. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. – IPT, (Relatório Nº 44.667).
- Sabesp-Cepas/Igc-USP. 1994. *Diagnóstico hidrogeológico da Região Metropolitana de São Paulo. Diagnóstico final*. Convênio Sabesp/Cepas-IGC/USP. São Paulo. 115 p.

Tucci, C.E.M. 1993. Evaporação e L.F.S. *Hidrologia*. cap. 7. Editoras da USP e evapotranspiração. In: Tucci, C.E.M & Beltrame, UFRGS.