

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ASCENSÃO DO NÍVEL FREÁTICO NO ENTORNO DE RESERVATÓRIOS EM HIDRELÉTRICAS: IMPACTOS E PROPOSTAS DE MEDIDAS MITIGATÓRIAS

José Eloi G. Campos¹; Marcio da Rosa M. Bessa²; Vagney Aparecido Augusto³; André Walczuk Gomes⁴ & Guilherme Neiva. R. Oliveira⁵

RESUMO – Inúmeros impactos ambientais devido à formação de reservatórios artificiais de hidrelétricas, especificamente vinculados à hidrogeologia, são reportados na literatura acadêmica e em relatórios técnicos. Neste trabalho, são apresentados alguns problemas decorrentes da elevação artificial do nível freático que são pouco conhecidos e desconsiderados em diferentes estudos. Dentre os aspectos intervenientes, os principais parâmetros que controlam a elevação dos níveis das águas subterrâneas nas áreas marginais aos reservatórios são: declividade, tipos de materiais e profundidade natural do nível freático. As heterogeneidades naturais do subsolo são pouco consideradas nos estudos de modelagem e isso pode gerar resultados inconsistentes. Neste caso, devem ser considerados: presença de aquíferos suspensos, aquíferos confinados ou semiconfinados, variação lateral de condutividade hidráulica e variação das espessuras dos aquíferos. Para avaliação dos impactos, ainda devem ser consideradas as variações sazonais dos níveis freáticos, a diminuição do gradiente hidráulico gerado pela elevação dos níveis d'água e os efeitos da ascensão capilar como causa geradora de patologias geotécnicas, além de problemas ambientais.

ABSTRACT – Several environmental impacts due to artificial reservoirs formation for hydroelectric plants operation, specifically linked to hydrogeology, are reported in the academic literature and in technical reports. In this paper are presented some problems arising from artificial elevation of the water table that are little known and not commonly considered in different studies. Among the aspects involved are considered the main parameters that control the elevation of the levels in the marginal areas to reservoirs: declivity, types of materials and natural depth of the water table. The aquifers heterogeneities are barely considered in modeling studies and can cause inconsistent results. In this case, must be considered: presence of perched aquifers, confined or semiconfined aquifers, lateral variation of hydraulic conductivity and aquifers thickness variation. For impact assessment should still be considered seasonal variations of water table levels, the decrease in the hydraulic gradient generated by rising of water table and the effects of capillary rising causing geotechnical pathogens.

Palavras-Chave – Aquífero livre, capilaridade, carga hidráulica.

1) Afiliação: Universidade de Brasília. Instituto de Geociências, Campus Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília – DF - Fone: 61 31076970. eloi@unb.br

2) Afiliação: Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília - DF - Fone: 61 998485902. m_bessa@hotmail.com

3) Afiliação: Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília - DF - Fone: 61 981036640. vagney@hotmail.com

4) Afiliação: Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília - DF - Fone: 61 992741343. walczuk.andre@gmail.com

5) Afiliação: Universidade de Brasília. Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro. Asa Norte. Brasília - DF - Fone: 61 981368338. gneiva.geo@gmail.com

INTRODUÇÃO

Grande parte dos efeitos negativos associados à formação de reservatórios artificiais para operação de hidrelétricas é reconhecida e considerada em estudos ambientais. Dentre as principais publicações a este respeito se destacam os trabalhos de Albuquerque Filho (2002) e Albuquerque Filho *et al.* (2001 e 2010).

A elevação artificial dos níveis freáticos potencialmente causa os seguintes impactos diretos ou indiretos: risco de desenvolvimento de patologias geotécnicas em edificações, contaminação dos aquíferos, afogamento de sepulturas e fossas sépticas, geração de áreas úmidas ou de áreas permanentemente encharcadas, supressão de vegetação não adaptada a umidade elevada, desestabilização de encostas marginais (principalmente na região de remanso do reservatório) e afogamento de cavidades naturais na zona não saturada (cavernas vadasas).

Entretanto, alguns impactos não tem sido comumente reportados e podem gerar efeitos que afetam a infraestrutura instalada, o escoamento natural das águas subterrâneas (principalmente na componente de interfluxo), a salubridade ambiental de populações afetadas e os sistemas de saneamento *in situ* (mesmo quando não afogam fossas e sumidouros).

O objetivo deste trabalho é avaliar alguns destes efeitos e apresentar medidas que possam minimizá-los (quando possível) e algumas de suas implicações.

RELAÇÕES ENTRE NÍVEL DO RESERVATÓRIO E NÍVEL FREÁTICO

A elevação artificial do nível da lâmina d'água pelo represamento e conseqüente formação de reservatório resulta na elevação dos níveis freáticos dos aquíferos rasos que se encontram em conexão hidráulica com o reservatório. Esta elevação ocorre de forma restrita à faixa marginal do reservatório, e não de forma generalizada a grandes distâncias da orla (Figura 1). A largura da faixa que sofre elevação é função da interação de quatro fatores principais:

- altura da elevação da lâmina d'água do rio;
- declividade do terreno;
- profundidade original do nível freático e
- natureza do material que compõe o aquífero.

A elevação do nível freático é diretamente proporcional à elevação da lâmina d'água do rio. Nas áreas próximas ao barramento, a elevação será mais importante que nas áreas de remanso, de forma que nas áreas em que o rio praticamente não sai de seu canal natural a elevação do freático é da ordem de centímetros. Nestes casos, o nível do aquífero se estabiliza aproximadamente à condição das vazões máximas do rio (em que ocorria a elevação natural da lâmina d'água do rio).

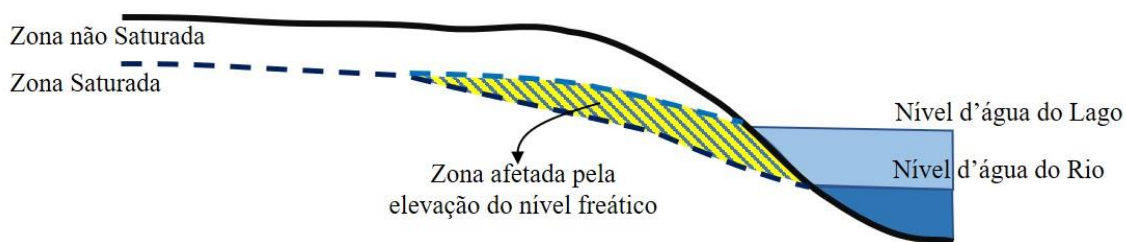


Figura 1. Ilustração esquemática mostrando que a elevação artificial do nível freático se dá de forma limitada à orla do reservatório, sendo maior junto à margem e diminuindo progressivamente quando se afasta da margem.

A declividade do terreno funciona de forma inversa com relação à elevação do nível d'água, de forma que, quanto maior a declividade, menor a elevação e menor a largura da faixa afetada pela elevação da lâmina d'água do rio. Em faixas de terreno pouco íngremes e planas, as áreas afetadas pela elevação podem superar 200 metros da orla (Figura 2).

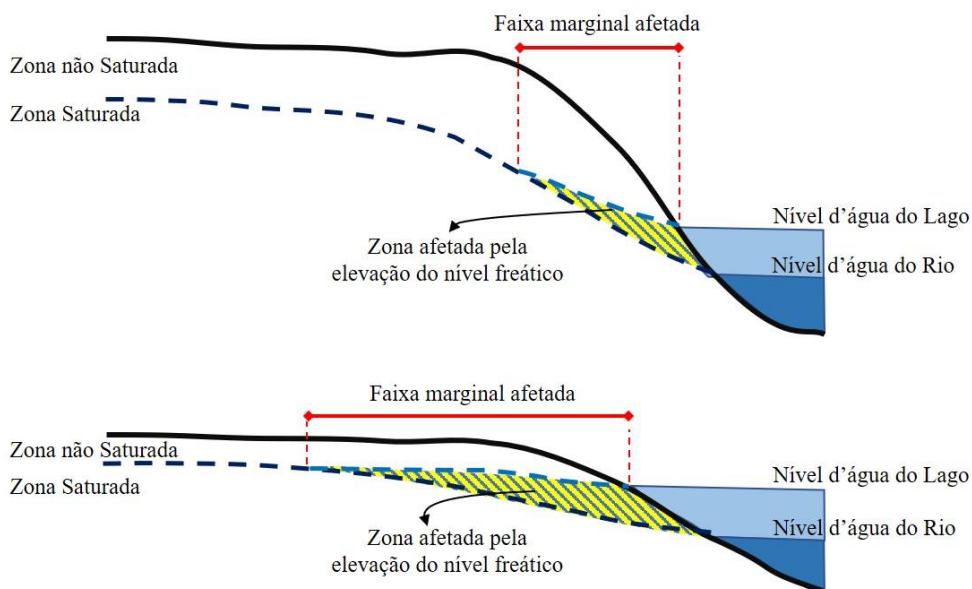


Figura 2. Apresentação gráfica do controle da declividade na determinação da faixa afetada pela elevação artificial do nível freático devido à formação do reservatório.

A faixa que sofre interferência dependerá da profundidade original do nível freático, pois em áreas com níveis freáticos rasos, níveis menores de sobrelevação do topo da superfície saturada do aquífero já se tornam representativos e podem causar efeitos deletérios em fundações de edificações.

A natureza do material se refere às diferenças granulométricas que compõem o arcabouço do aquífero, que são classificadas como argila, silte, areias (fina e grossa) e cascalhos. Quanto menor o tamanho dos grãos maior será a elevação em resposta à subida da lâmina d'água do rio (Manoel Filho, 2008). Em locais dominados por cascalhos, a elevação fica restrita à subida da zona saturada e o efeito da capilaridade é mínimo ou desprezível. Em locais em que dominam lamias (silte e argila), a elevação por capilaridade é máxima, o que resulta em elevações consideráveis da superfície freática (que pode

alcançar mais de 2 metros).

CAUSAS DAS HETEROGENEIDADES DOS AQUÍFEROS

As heterogeneidades e anisotropias dos aquíferos aumentam a complexidade dos sistemas e causam a superposição de superfícies potenciométricas de diferentes reservatórios. Nos sistemas relacionados às áreas urbanas em estudo, a principal heterogeneidade é a presença de camadas impermeáveis a diferentes profundidades que resultam na formação de aquíferos suspensos. A manutenção de zonas saturadas dentro da porção vadosa dos aquíferos regionais causa a manutenção de níveis freáticos rasos em contraste lateral a níveis freáticos regionais mais profundos (Figura 3).

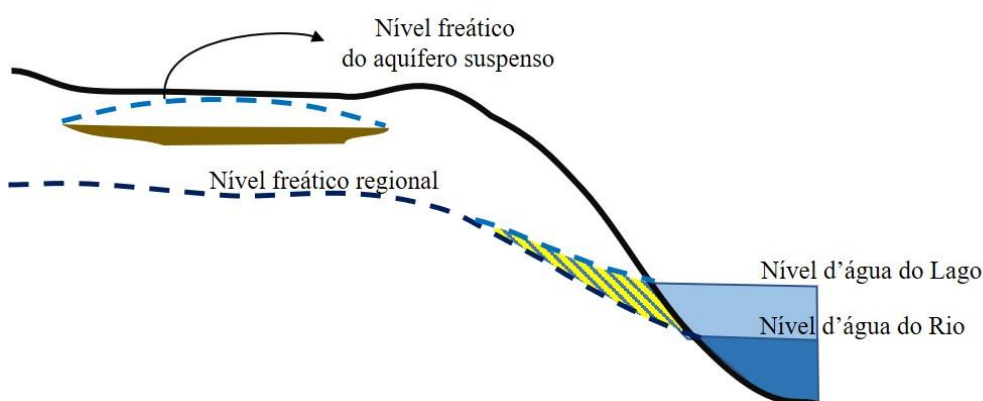


Figura 3. Exemplo de aquífero suspenso condicionado à camada de rocha impermeável na zona não saturada do aquífero regional, cujo exutório é o sistema rio-reservatório.

Dependendo da localização dos aquíferos suspensos, os níveis rasos podem coincidir com elevações ou depressões da topografia.

Os sistemas suspensos dificultam a modelagem previsional da elevação artificial dos aquíferos, bem como sua modelagem matemática, pois os softwares desenvolvidos para esta finalidade são apenas aplicados para aquíferos homogêneos e isotrópicos.

No caso da presença de camadas impermeáveis e manutenção de aquíferos suspensos em situações de elevação artificial por represamento de rios, o principal problema observado é a diminuição do gradiente hidráulico local, o que pode manter o nível elevado por maior intervalo de tempo (inclusive nos meses mais secos do ano), mesmo a maiores distâncias do reservatório (Figura 4). Esta condição pode manter áreas permanentemente úmidas, causando problemas de salubridade ambiental em residências de áreas urbanas e eventualmente problemas de patologias geotécnicas em obras com fragilidade de estruturas e fundações.

Como ocorre a diminuição do gradiente da carga hidráulica, há diminuição da velocidade do fluxo, pois a velocidade média linear de fluxo é diretamente proporcional ao desnível da superfície potenciométrica, conforme equação seguinte (velocidade de Darcy):

$$V = K * \text{Grad } h / \eta_e; \quad (1)$$

Onde: V = velocidade linear média de fluxo no aquífero; K = condutividade hidráulica do meio; $\text{Grad } h$ = gradiente da carga hidráulica ($\Delta h/\Delta s$) e η_e = porosidade efetiva. Como a condutividade hidráulica e a porosidade efetiva não mudam com a elevação do nível do rio, a velocidade é controlada pela elevação da lâmina d'água. Este efeito pode ser sentido inclusive em locais em que não houve influência da elevação do nível freático.

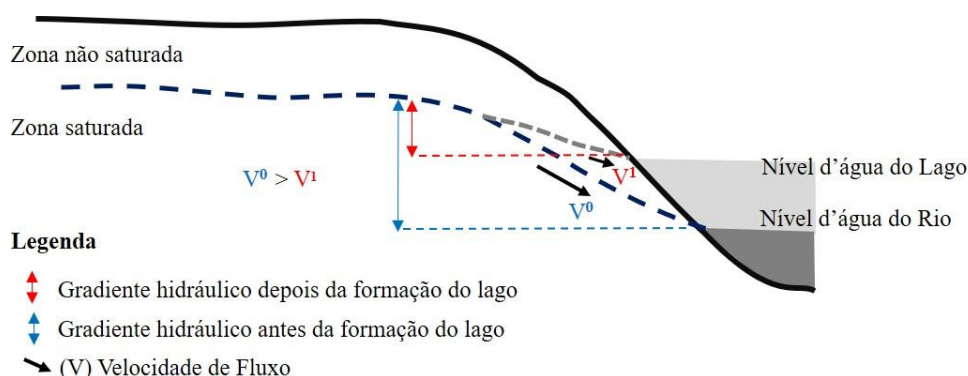


Figura 4. Figura ilustrativa da diminuição do gradiente hidráulico devido à elevação da cota do exutório. Neste caso a descarga do aquífero será mais lenta mesmo fora da zona afetada pela elevação do nível freático.

VARIAÇÕES SAZONAIS EM FUNÇÃO DA RECARGA

No funcionamento hídrico de um aquífero há variação sazonal da carga hidráulica do nível freático devido à alternância de períodos mais chuvosos e secos (Figura 5). Este comportamento ocorre em sistemas naturais ou em sistemas afetados por elevação artificial.

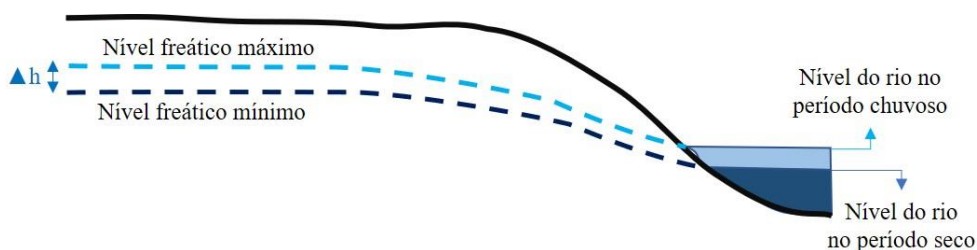


Figura 5. Seção que mostra que a variação sazonal do nível freático comporta-se de forma homogênea com relação ao relevo local (considerando sistema homogêneo e isotrópico).

A variação anual é função do volume de chuva e de sua distribuição espaço-temporal; da porosidade efetiva do meio; da vazão de descarga do aquífero e do gradiente hidráulico local (Healy & Cook, 2002; Nimmo *et al.*, 2015).

De forma geral, quanto maior a altura pluviométrica maior é a variação anual. Caso o período seco seja muito amplo, há uma tendência de diminuição do Δh em decorrência das perdas por evapotranspiração e pela demanda hídrica da vegetação, além de atraso no estabelecimento de condições de umidade em que a água se torna livre para percolar em um meio poroso.

Quanto menor a porosidade efetiva do meio, maior a elevação e o Δh do nível freático, pois os espaços vazios interconectados são menores e um mesmo volume de água necessita de maior volume de aquífero para ocupação dos vazios.

A vazão de descarga do aquífero é diretamente proporcional à variação anual do nível freático de forma que, quanto maior a descarga, mais contrastante é o nível mínimo, contribuindo, portanto, para aumentar a variação absoluta.

O gradiente hidráulico também apresenta relação direta com o Δh do nível freático, resultando em maiores variações nos locais com maiores declividades do terreno (maior gradiente) e em variações mais discretas (muitas vezes menores que 1 metro) nos locais muito planos e com baixa declividade (que resultam em restritos gradientes hidráulicos).

PROPOSTAS DE MEDIDAS MITIGATÓRIAS

Cinco ações, a seguir detalhadas, são consideradas para minimizar os impactos da elevação artificial dos níveis freáticos: implantação de reforços estruturais; preenchimento de fendas; interrupção da operação de cemitérios; implantação de sistema adequado de saneamento *in situ*; além de remoção e reconstrução de edificações.

Implantação de Reforços Estruturais

As técnicas convencionais de reforços estruturais são comumente aplicadas a pilares, vigas e lajes, como, por exemplo, apresentado por Piancastelli (1997). Contudo, em regiões urbanas submetidas a elevação artificial do nível freático, em que existem edificações consideradas pouco convencionais, sem estruturas em concreto incluindo vigas, pilares e lajes podem ser desenvolvidas patologias geotécnicas graves. Na maior parte dos casos em que há patologias nas edificações, as obras são erguidas sobre baldrame de pedra ou vigas horizontais sem associação com pilares.

Desta forma, os reforços estruturais, quando afetos a questões relacionadas com a formação do reservatório, deverão seguir diretrizes específicas, mesmo porque as formas tradicionais de reforçar estruturas são muito dispendiosas e tecnicamente complexas. Assim, os reforços devem ser aplicados na forma de ampliação de sapatas com concreto armado e revestimento de baldrame com encapsulamento da estrutura com concreto armado.

Para cada caso devem ser consideradas as possibilidades dos reforços de vigas serem por encamisamento ou por cintamento. As vigas devem ter reforços às diferentes forças atuantes, como a flexão, cisalhamento e torção. As fundações devem ser protegidas por ampliação da sapata, estaqueamento ou por injeção de concreto.

Preenchimento de Fendas

Para os casos em que a evolução das patologias for solucionada com a eliminação dos processos causadores e/ou por reforços estruturais, as fendas devem ser preenchidas e os revestimentos de paredes completados, incorporando-se a utilização de telas ou não, conforme o caso. Esta ação deverá limitar a evolução dos processos de queda de rebocos e ampliação das fendas.

Para o preenchimento deve ser aplicada argamassa com traço forte com preenchimento total das fendas. No caso de reboco em paredes de adobe, um chapisco com traço de argamassa com pedrisco deve ser implantada antes do reposicionamento do reboco. Esta ação visa aumentar a aderência em superfícies de materiais com alto contraste físico, incluindo aspectos de dilatação e resposta distinta à carga.

Interrupção Definitiva de Novos Sepultamentos nos Cemitérios

Segundo a Resolução CONAMA nº 368, publicada em 29/03/2006, o nível inferior das sepulturas deverá estar a uma distância de pelo menos um metro e meio acima do mais alto nível do lençol freático, medido no fim da estação chuvosa.

Desta forma a operação dos cemitérios localizados em áreas em que a elevação do nível freático foi crítica deve ser interrompida, pois a maior parte de sua área e adjacências permanece com níveis freáticos mais rasos que 1 metro no pico do período chuvoso do ano.

Mesmo considerando as questões culturais e religiosas, os órgãos licenciadores e o poder público local devem concentrar esforços no sentido de interromper definitivamente os sepultamentos nas áreas afetadas. Os órgãos ambientais devem emitir pareceres e resoluções com a determinação de interrupção definitiva de manutenção dos sepultamentos nas áreas afetadas e o poder público local deverá ser incumbido da fiscalização e execução das determinações.

Limpeza e extravasamento de fossas existentes e implantação de sistemas adequados de saneamento *in situ*

Nos locais em que comprovadamente os níveis freáticos originalmente profundos foram elevados para profundidades menores que 1,5 metro, com conseqüente afogamento de fossas, entende-se que novos sistemas de saneamento *in situ* ou coletivos devem ser implantados para solução dos problemas de moradia nestes locais.

O saneamento *in situ* é feito basicamente de duas formas: sistema de fossa e sumidouro ou sistema de fossa e vala de infiltração. No saneamento *in situ* a fossa séptica é representada por uma caixa impermeável, geralmente construída em alvenaria ou em concreto armado. Esta caixa recebe

todo o efluente gerado pelos ocupantes da residência, incluindo descarga sanitária, banho, cozinha e pia sanitária. Sua função é de depuração primária do efluente, em geral sob ação de bactérias. Como o volume de líquido é maior que o volume de sólidos (lodo) esta caixa rapidamente fica saturada e o líquido é direcionado para o sumidouro ou vala de infiltração e é infiltrado na zona não saturada do aquífero.

O uso de sumidouro ou vala de infiltração é determinado pela profundidade do nível freático. Quando a zona saturada é profunda, o sumidouro é instalado, pois há maior capacidade de infiltração, minimizando os riscos de contaminação e saturação. Para os casos em que o nível é raso ou muito raso (menor que 1,5 metros) ou que os solos são muito impermeáveis (condutividade hidráulica menor que 10^{-6} m/s), a alternativa é instalar o sistema de vala de infiltração. Neste caso, a infiltração é mais horizontal que vertical, mas há dissipação do efluente previamente depurado, evitando odores e saturação superficial do solo.

O sumidouro é representado por uma caixa construída com tijolos espaçados que permite a infiltração vertical e lateral do líquido oriundo da fossa séptica. A vala de infiltração é um sistema de trincheira com uma tubulação perfurada no seu interior e recoberta por material de alta permeabilidade (brita ou cascalho de seixo).

Remoção e Reconstrução

Para as situações extremas, que comprovadamente sejam relacionadas com elevação do lençol freático e em que se mostrem ineficazes as intervenções potenciais anteriores relacionadas, e onde há risco iminente de colapso da edificação, a solução mais adequada deverá ser a remoção e reconstrução da edificação afetada ou indenização.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE FILHO J.L. (2002). *“Previsão e análise da elevação do nível do lençol freático na avaliação de impacto ambiental (AIA) de reservatórios hidrelétricos”*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro-SP, 522 p.
- ALBUQUERQUE FILHO J.L.; SILVA, A.L.B.; SOARES, L. (2001). *“Monitoring of water table oscillation due to reservoir impoundment: the case of Três Irmãos Reservoir and the city of Pereira Barreto, SP, Brasil”* in Proceedings: XXXI IAH CONGRESS, Munich, Sep. 2001, 2, pp. 1111 – 1117.
- ALBUQUERQUE FILHO, J.L.; SAAD, A.R.; ALVARENÇA, M.C. (2010). *“Considerações acerca dos impactos decorrentes da implantação de reservatórios hidrelétricos com ênfase nos efeitos ocorrentes em aquíferos livres e suas consequências”*. Geociências, 29(3), pp. 355 – 367.
- HEALY, R.W. & COOK, P.G. (2002). *“Using groundwater levels to estimate recharge”*. Hydrogeology Journal, 10(1), pp. 91 – 109.

- MANOEL FILHO, J. (2008). “*Ocorrência das águas subterrâneas*”, in *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. Org. e Coorde. por Feitosa, F.A.C.; Manoel Filho, J.; Feitosa, E.C. e Demétrio, J.G.A, 3^a ed. rev. e ampl., Rio de Janeiro, CPRM/LABHID, pp. 53 – 75.
- NIMMO, J. R.; HOROWITZ, C.; MITCHELL, L. (2015). “*Discrete-storm water-table fluctuation method to estimate episodic recharge*”. *Groundwater*, 53(2), pp. 282 – 292.
- PIANCASTELLI, E.M. (1997). *Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto Armado*. EEUFMG Belo Horizonte – MG, 160 p.