
Variação intra-sazonal da potencialidade hídrica subterrânea e sua influência na outorga

Intra-seasonal variation of groundwater resources availability and its influence on the concession of water rights

Armando César Rodrigues Braga¹; Janiro Costa Rêgo² e Carlos de Oliveira Galvão³

^{1,2,3} Unidade Acadêmica de Engenharia Civil, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil

armandocesar.r@gmail.com; janiro@dec.ufcg.edu.br; galvao@dec.ufcg.edu.br

Recebido: 30/10/14 - Revisado: 27/01/15 - Aceito: 08/04/15

RESUMO

Este trabalho utiliza técnicas de modelagem computacional para estimar a potencialidade hídrica subterrânea de uma região da Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba. Os resultados da aplicação do modelo detectaram uma exploração excessiva na região, verificando-se que os critérios adotados pelo decreto estadual que regulamenta a outorga pelo uso da água subterrânea não são suficientes para a definição do valor a ser retirado. É proposto um método, em complemento às diretrizes existentes, para determinação de um volume sustentável a ser explorado, denominado de outorga modulada, que considera o marcante regime sazonal da recarga do aquífero. Para a estação seca anual, é determinado um valor bimestral a ser explorado de forma que o déficit provocado seja mínimo. Os resultados mostraram uma redução de 93% no déficit, através de uma redução de apenas 33% no volume explorado.

Palavras Chave: Modelagem. Aquífero. Bacia sedimentar

ABSTRACT

This paper uses computational modelling techniques to estimate groundwater resources availability in a region of the Coastal Sedimentary Basin of the Low Course of Paraíba River Basin, in Brazil. The results of the model application detected an over-exploitation of groundwater, an evidence that the criteria adopted by local regulations for the concession of water rights are not sufficient for estimating the limits of exploitation. Then, a method for defining additional criteria is proposed: the modulated concession of water rights. This approach considers the well marked seasonal regime of groundwater recharge. For the annual dry season, a bimonthly exploitable value is determined, so that the deficit is kept as minimum. The results showed a reduction of 93% in the deficit with only a 33% reduction in the exploited volume.

Keywords: Modelling. Aquifer. Sedimentary basin

INTRODUÇÃO

Tradicionalmente a gestão dos recursos hídricos era dividida em duas partes, uma que tratava dos recursos hídricos superficiais, tidos como mais abundantes e acessíveis, e outra dos recursos hídricos subterrâneos, muitas vezes não suficientemente conhecidos. No Brasil, começa a haver uma mudança de orientação nesta visão a partir da lei 9.433/97 (BRASIL, 1997), que institui a Política Nacional dos Recursos Hídricos. Esta lei introduz um conceito mais global, o da gestão integrada dos recursos hídricos, que, entre outros aspectos, leva em consideração a interdependência dos recursos superficiais e subterrâneos.

Na região Nordeste do Brasil, um dos mais importantes sistemas aquíferos encontra-se na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba, que inicia na cidade do Recife e se estende até próximo da fronteira com o Rio Grande do Norte. Dentro dos limites da Paraíba, ela intercepta a principal bacia hidrográfica do estado, na região denominada de Baixo Curso do Rio Paraíba.

Esta região do encontro entre a bacia sedimentar costeira e a bacia hidrográfica do rio Paraíba foi estudada no âmbito do Projeto ASUB (2010), onde passou a ser denominada de bacia sedimentar do baixo curso do rio Paraíba. Ela é uma bacia preenchida por sedimentos de fácies continentais e marinhas reunidas sob a denominação de Grupo Paraíba, de idade cretácea, que, por sua vez, é constituído por duas formações que são, da base para o topo, Beberibe e Gramame. Estas formações são capeadas, em discordância angular erosiva, por sedimentos Cenozóicos da Formação Barreiras e depósitos flúviomarítimos, dunas e aluviões mais recentes, aqueles constituindo as planícies costeiras e os leitos e margens de cursos d'água que drenam a bacia sedimentar (ASUB, 2010).

Na Paraíba, a outorga de uso da água subterrânea é regulamentada pelo Decreto Nº 19.260/1997 (PARAÍBA, 1997), que estabelece como critérios a vazão nominal de teste de poço e a capacidade de recarga do aquífero. Entretanto, não há um processo metodológico bem definido para a utilização destes critérios. O Projeto ASUB buscou preencher esta lacuna tendo como objetivo principal o estabelecimento de critérios para outorga, para enquadramento dos corpos d'água e para a cobrança do uso de água, de forma integrada.

Um dos principais conceitos implantados pelo Projeto ASUB foi a criação de zonas de gerenciamento (Figura 1). Esse zoneamento foi realizado para suprir a necessidade da existência de regiões de gerenciamento com áreas menores que a da bacia hidrográfica. A determinação de tais zonas foi realizada a partir das características hidrológicas, topográficas, geológicas e da demanda de uso de água (COSTA et al., 2011).

Nesta linha, o presente trabalho tem o objetivo de contribuir para o aprofundamento e o aperfeiçoamento dos critérios de outorga praticados atualmente. Para isso foi considerada uma das zonas de gerenciamento da bacia sedimentar do baixo curso do rio Paraíba, a Zona 6 do zoneamento proposto pelo Projeto ASUB (Figura 1). Esta zona, onde estão inclusas partes dos populosos municípios paraibanos João Pessoa, Bayeux e Santa Rita, apresenta visível tendência a uma situação de elevado estresse do ponto de vista dos recursos hídricos subterrâneos

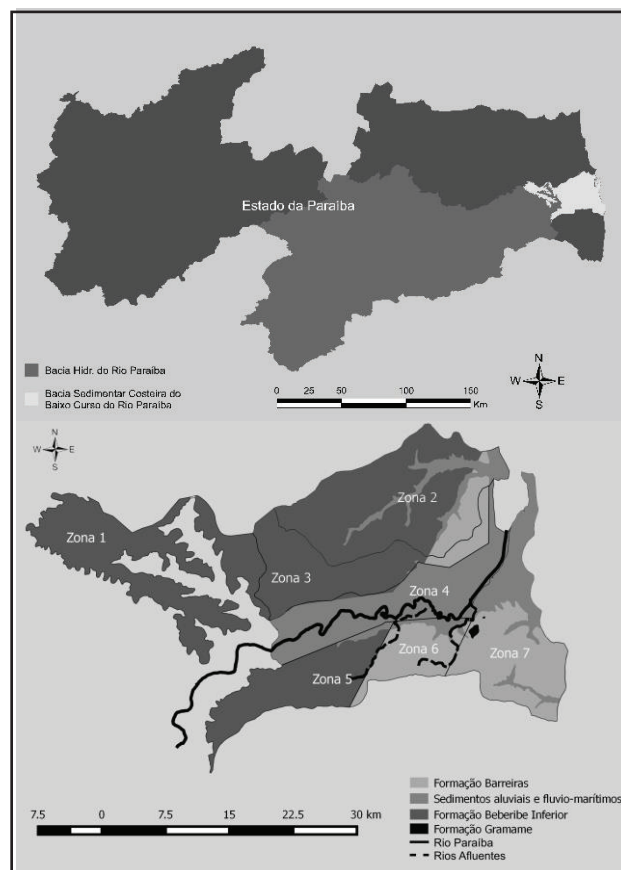


Figura 1 – Zonas de Gerenciamento na região do baixo curso do rio Paraíba (ASUB, 2010)

e superficiais. Ao lado da Zona 6, encontra-se a Zona 7, que será abordada de forma indireta neste trabalho, uma vez que recebe a maior parte da descarga subterrânea proveniente da zona estudada.

A primeira etapa da investigação tratou de avaliar a potencialidade hídrica da área de estudo, incluindo sua variação temporal dentro do período seco (intra-sazonal) e o nível atual de exploração por poços. Para isso, foi empregado o consagrado pacote computacional MODFLOW (McDONALD; HARBAUGH, 1988) na construção e aplicação de um modelo matemático que simulasse o comportamento hidrodinâmico do sistema ocorrente na área estudada.

Porém, devido à pequena quantidade de informações hidrogeológicas confiáveis, quais sejam, perfis litoestratigráficos, níveis estáticos e dinâmicos nos poços existentes e respectivas vazões de exploração, modelar a região hidrogeológica revelou-se uma difícil tarefa para cuja realização foi necessário elaborar e testar a razoabilidade de hipóteses e avaliações preliminares.

Com o modelo computacional funcionando a contento, foi possível quantificar as disponibilidades da região para assim avaliar, por exemplo, se a exploração atual não está sendo realizada de forma predatória e, neste sentido, também avaliar se os critérios utilizados para a determinação do volume de água a ser retirado são coerentes com a realidade hidrogeológica do aquífero.

Finalmente, com base nos resultados encontrados, procurou-se sugerir uma nova forma para a decisão sobre o volume a ser outorgado que levasse em consideração as peculiaridades temporais do aquífero e, assim, contribuir para uma gestão integrada dos recursos hídricos da forma mais eficiente.

MODELAGEM

A Zona 6, com área de 66,86 km², se limita a oeste pelas falhas dos rios Tibiri/Tapira, ao norte pelo rio Paraíba, a leste pela falha de Cabedelo e ao sul pelo divisor da bacia do rio Gramame. Apresenta um sistema hidrogeológico livre, composto pelas formações Barreiras e Beberibe (superior e inferior). A formação Barreiras possui espessura entre 20 m e 70 m, com a presença de areias, siltes e argilas repetidas de forma irregular verticalmente, variando a predominância do material. Já a formação Beberibe, sotoposta à anterior, é composta por, principalmente, arenitos com espessura entre 50 m e 200 m.

O sistema apresenta, no geral, água com qualidade aceitável, sendo compatível para usos como abastecimento humano, irrigação e uso industrial. O consumo tende a aumentar cada vez mais devido ao crescimento populacional e econômico da região. Vale ressaltar a importância do sistema para o abastecimento da zona vizinha, que se configura como o maior polo econômico do estado.

O modelo conceitual

A partir dos diversos dados obtidos através das fichas de poços (perfis litológicos, nível estático, etc.), aliados a informações da configuração topográfica da região, foram identificadas as principais características litológicas e dimensionais da área de estudo para construir um modelo conceitual do sistema aquífero. O modelo formulado está representado na Figura 2 e possui as características descritas a seguir.

O sistema tem como fronteira inferior o embasamento rochoso cristalino impermeável que se estende por toda área estudada, atuando assim como camada confinante. Apresenta um sistema livre único, composto, principalmente, pelas formações Barreiras na parte superior, com ocorrência na região norte, próximo ao rio Paraíba, de sedimentos aluviais e na parte inferior é constituído pela formação Beberibe. Para a modelagem foi considerada uma única camada com condutividade hidráulica equivalente e espessura constante.

O aquífero é recarregado pelas chuvas, pelo fluxo subterrâneo na fronteira oeste e pelos sistemas fluviais. Considera-se que não há fluxo atravessando a fronteira sul da zona, já que ela corresponde ao divisor de águas (superficiais e subterrâneas) entre as bacias do Paraíba e do Gramame. Já a descarga ocorre através das fronteiras leste e norte, e também através dos rios. A circulação do fluxo ocorre, portanto, no sentido sudoeste-nordeste. Segundo Batista et al. (2011), a região leste da área de estudo é caracterizada por uma alta exploração na sua fronteira, chegando a atingir níveis potenciométricos negativos em relação ao nível do mar para o aquífero confinado.

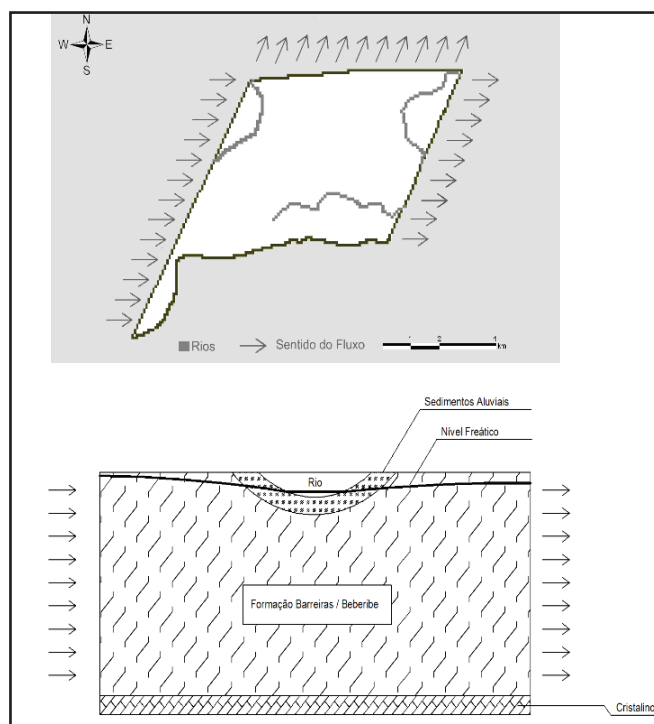


Figura 2 - Modelo Conceitual

O modelo matemático

O programa computacional PMWIN (CHIANG; KINZELBACH, 1998), que usa a plataforma do MODFLOW (McDONALD; HARBAUGH, 1988), foi utilizado, neste trabalho, para a implementação do modelo matemático do sistema aquífero. O MODFLOW, por sua estrutura computacional flexível, cobertura mais completa dos processos hidrogeológicos e por ser um software livre se tornou um padrão em todo o mundo (ZHOU; LI, 2011).

O modelo resultante é bidimensional horizontal, com uma camada de espessura constante e igual a 250 m. A área do modelo foi discretizada em células de 100m x 100m de dimensão. As fronteiras apresentam as características descritas a seguir.

Na fronteira sul da área de estudo está localizado o divisor de águas de duas bacias hidrográficas, a do Rio Paraíba e

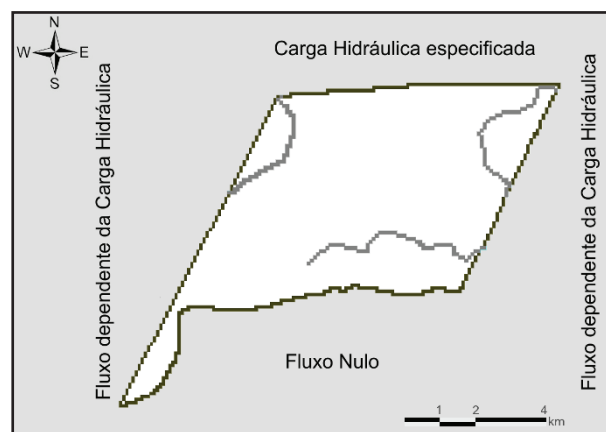


Figura 3 – Fronteiras da área de estudo

do Rio Gramame. Para representá-lo no modelo computacional foi utilizada a condição de fluxo especificado com valor zero (condição de Neumann), ou seja, fluxo nulo naquela fronteira (Figura 3).

A região norte apresenta como limite a falha e o rio Paraíba. Desta forma será considerada a carga hidráulica no rio como a uma carga hidráulica especificada (condição de Dirichlet) na fronteira para o início do cálculo no modelo. Para calibragem no regime permanente esta carga será considerada como constante.

Nas fronteiras oeste e leste da área de estudo foi utilizada a condição de que o fluxo depende da carga hidráulica (Condição de Cauchy), pois são áreas de entrada e saída de fluxo na região.

Calibração do Modelo

A calibração do modelo foi realizada para o regime permanente com o objetivo de determinar os valores das condutividades hidráulicas para o aquífero e, posteriormente, as condutâncias para os leitos dos rios. Após esta etapa foram parametrizados os dados para a implantação do modelo no regime transitório.

Foram consideradas as cargas dos poços com dados obtidos no SIAGAS (Sistema de Informação de Águas Subterrâneas). Nas fronteiras oeste, norte e leste, foram utilizados os dados da interpolação topográfica levando em consideração as cotas dos rios e suas inclinações.

A calibração dos parâmetros para o regime permanente foi realizada utilizando o módulo PEST do pacote computacional MODFLOW, que realiza a calibração automaticamente usando um método de regressão não linear (DOHERTY, 2000). Devido à economia de tempo gerada, esta sub-rotina de otimização tem sido amplamente utilizada em todo o mundo (GILFEDDER et al., 2012; DIEM et al., 2014; MOHANTY et al., 2014).

Para melhor representação da realidade na calibração dos parâmetros, foi necessária a divisão da área de estudo em três sub-regiões (Figura 4) com características litoestratigráficas semelhantes. A sub-região 1 foi definida em função dos sedimentos fluviais presentes, enquanto que as sub-regiões 2 e 3 apresentam camadas constituídas pelas formações Barreiras e Beberibe, sendo, entretanto, esperado que possuam espessuras

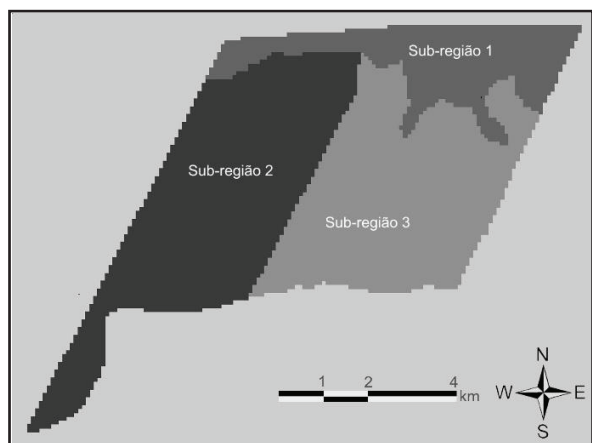


Figura 4 - Sub-regiões de condutividade hidráulica

diferentes.

Desta forma, após as iterações utilizando o PEST, o resultado apresentado para a condutividade hidráulica foi de 5,46 m/d na sub-região 1, 8,134 m/d para a sub-região 2 e 3,358 m/d para a sub-região 3. Estes valores se apresentam dentro da faixa estabelecida para a região por Costa et al. (2007).

Foi realizada também a simulação de rios e suas interações com o aquífero. Os rios simulados foram o Tibiri, o Marés e o Sanhauá. As características dos rios implantadas no modelo foram a espessura e a elevação do leito, a largura e a carga hidráulica. Com esses dados foi realizada a calibração da condutância.

Na Figura 5 estão apresentados os mapas potenciométricos calculado e observado, onde se constata que o modelo representa razoavelmente o padrão de fluxo observado, levando em consideração a escassez de dados.

Para a simulação no regime transitório foi realizada a parametrização dos valores de porosidade efetiva utilizando

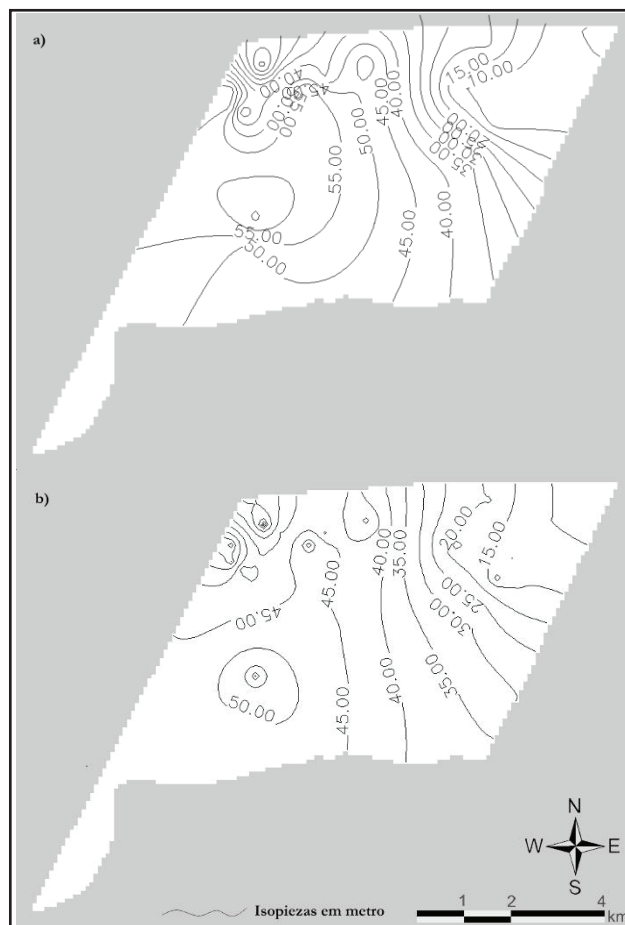


Figura 5 – Mapa potenciométrico observado (a) e calculado (b)

os dados obtidos na calibração para o regime permanente. Os resultados mais plausíveis foram aqueles obtidos com a Equação de Marotz (1968) (Equação 1 e Tabela 1).

No aquífero livre, o coeficiente de armazenamento (S) é equivalente à porosidade efetiva (η) e a transmissividade varia

$$\eta = 0.462 + 0.045 \ln(K) \quad (1)$$

Tabela 1 – Parametrização da porosidade efetiva

Sub regiões	Cond. Hidráulica - K (m/d):	Porosidade Efetiva - η	Transmissividade média - T (m ² /d)
1	5,460	0,1491	1245,03
2	8,134	0,1578	1908,96
3	3,358	0,1391	780,37

especialmente, uma vez que a espessura saturada não é constante. Assim foi considerada uma transmissividade média em cada sub-região, conforme apresentado na Tabela 1. A profundidade média na área estudada é de 11,40 m e a vazão nos poços varia de 1,7 m³/h a 232 m³/h, com média de 41,70 m³/h.

POTENCIALIDADE E OUTORGA

Com os parâmetros hidrodinâmicos do aquífero (condutividade hidráulica e porosidade efetiva) foi simulado um período típico de 8 meses sem chuvas, de setembro a abril. Este período inicia-se ao término da estação chuvosa, quando o aquífero se encontra recarregado. Esta condição inicial foi assumida como o resultado obtido com a calibração do modelo no regime permanente (Figura 6). A importância de realizar a modelagem após o período de recarga é a possibilidade de analisar o sistema aquífero para um período seco, onde é esperado que haja um maior estresse hídrico.

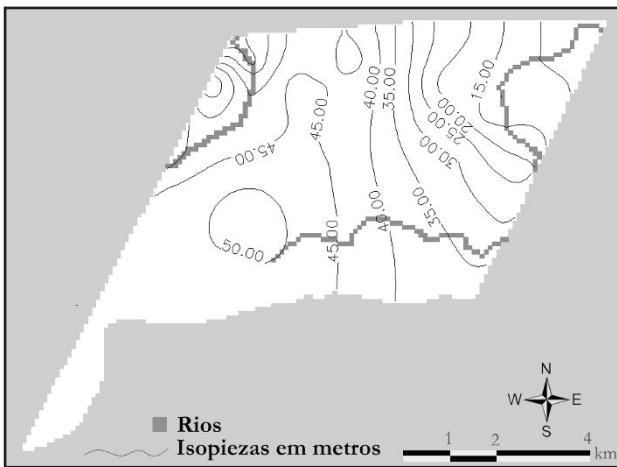


Figura 6 – Mapa potenciométrico: condição inicial

Potencialidade Hídrica

A primeira análise considerou a situação natural do sistema, isto é, como ele se comporta quando não há a existência de influências externas, como a presença de retiradas por bombeamento. Determinou-se, assim, a potencialidade do aquífero na área de estudo, que corresponde ao volume de água subterrânea que sai anualmente pelas suas fronteiras e rios.

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as superfícies freáticas em cinco diferentes estágios. A primeira (Figura 6) apresenta a condição inicial, imediatamente após o período de recarga. As quatro subsequentes foram obtidas com a simulação do fluxo

natural pelo modelo. A Figura 7a mostra o resultado após 60 dias, a Figura 7b após 120 dias, a Figura 7c com 180 dias e a Figura 7d com 240 dias.

O perfil AB, na Figura 8, corresponde às cargas piezométricas (Figuras 6 e 7) ao longo do trecho indicado em planta. Observa-se a clara diferença das cargas potenciais entre as duas fronteiras. Este gradiente faz com que o fluxo ocorra no sentido

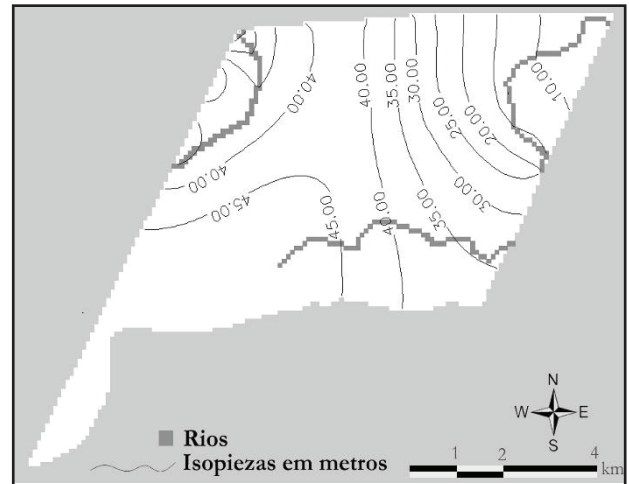


Figura 7a - Mapa potenciométrico aos 60 dias

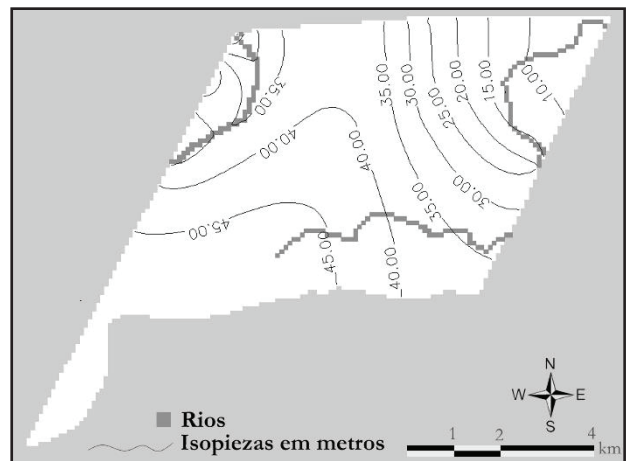


Figura 7b - Mapa potenciométrico aos 120 dias

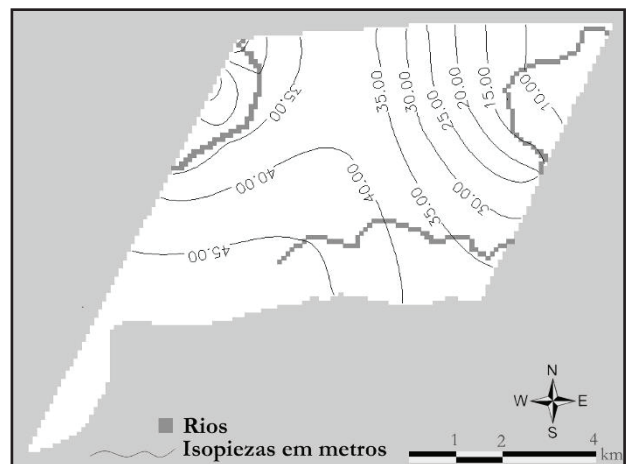


Figura 7c - Mapa potenciométrico aos 180 dias

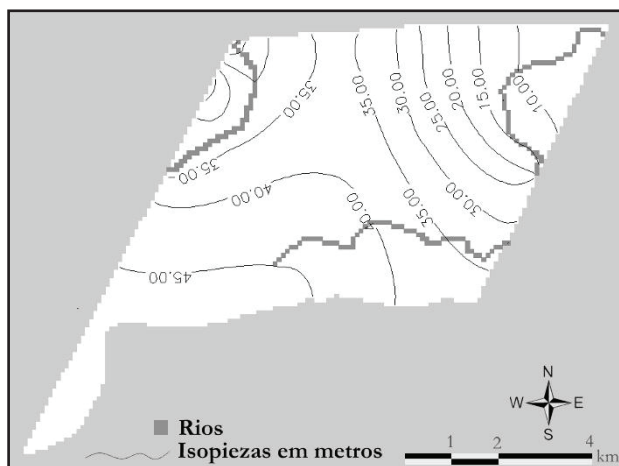


Figura 7d - Mapa potenciométrico aos 240 dias

oeste-leste, caracterizando assim a fronteira oeste como recarga e a fronteira leste com a descarga.

No perfil AB também é possível observar a existência de um divisor de águas dentro do aquífero, provocado pelo gradiente gerado pelo escoamento dos rios. Naturalmente ocorre um deslocamento do divisor à medida que o fluxo é liberado pelos rios e/ou pelas fronteiras do sistema, passando do ponto 1 para o ponto 2 ao longo dos 240 dias simulados.

Esta simulação da situação natural permitiu determinar a potencialidade hídrica subterrânea para, a partir desse valor, determinar a possibilidade de concessão das outorgas. Neste

cenário, o balanço hídrico forneceu um valor total aproximado de 20.000.000m³ de saídas para o período estudado. Entretanto, este valor não é uma vazão sustentável a ser explorada, uma vez que ela contempla toda a vazão que é descarregada através das fronteiras e através dos rios.

Do valor total descarregado pelo rio no período simulado é retirado 40% da quantidade de fluxo, que se destina, segundo Costa et al. (2007), à parcela da vazão de base para atender os requisitos de vazão ecológica, necessária para a proteção e manutenção dos ecossistemas.

Também é subtraído da descarga um valor médio mensal de 1.070.000 m³ que, segundo Batista et al. (2011), é a estimativa do volume recarregado pela Zona 6 na Zona 7 da bacia estudada. Portanto, o volume total disponível para exploração se reduz a 5.500.000m³. Em termos de valores regularizados, esta vazão é aproximadamente 0,26 m³/s.

A potencialidade hídrica representa uma vazão de saída que não é constante ao longo do tempo. Desta forma, caso um valor médio estimado seja outorgado, o manancial será efetivamente explorado de forma não sustentável. Este fato é observável ao analisar o gráfico da Figura 9, que mostra a simulação da potencialidade ao longo do tempo.

Nos primeiros meses há um volume descarregado superior ao volume médio, porém nos últimos meses do período simulado as descargas possuem valores bem inferiores ao volume médio. É possível notar que a curva de volume descarregado mensal possui uma configuração não linear, podendo ser ajustada a uma função exponencial.

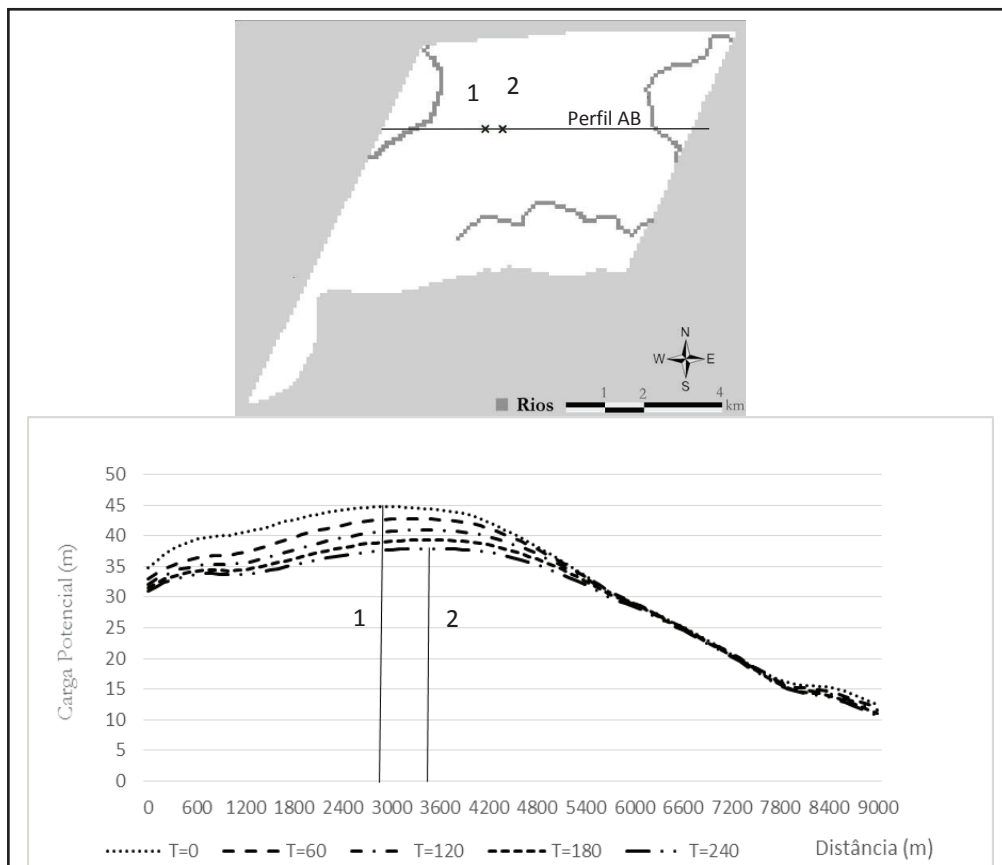


Figura 8 – Perfil AB – Localização em planta e gráfico: Carga x Distância

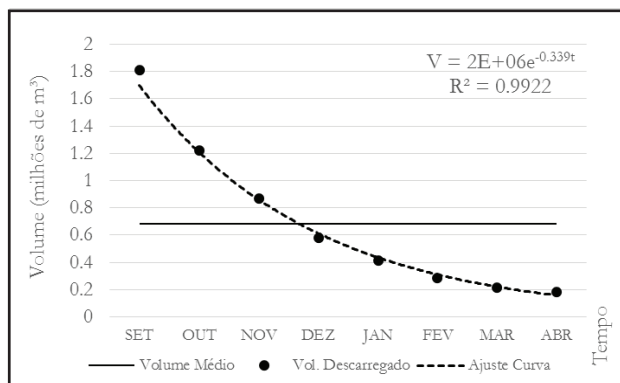


Figura 9 – Volume Descarregado x Tempo. Valores obtidos pelo balanço hídrico realizado na área de estudo, pelo modelo

Diagnóstico da exploração

A distribuição espacial dos poços (Figura 10) mostra uma alta concentração no setor norte da área de estudo, onde, durante a simulação para o regime natural, foram identificados os menores valores de cargas potenciométricas. Nesta região há uma alta densidade habitacional e várias indústrias, o que explica boa parte dessa concentração de poços. Encontrou-se que o valor total bombeado pelos poços identificados é de 24.524 m³/dia, admitindo um regime de bombeamento de 12 horas por dia.

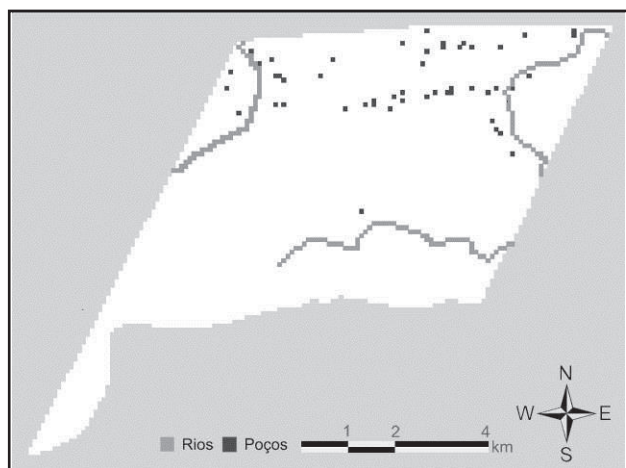


Figura 10 – Distribuição espacial dos poços simulados

Na Figura 11 está a comparação entre as cargas potenciais para a última iteração simulada no estado natural e no estado com o bombeamento simulado. Nela é possível perceber o rebaixamento nas linhas das cargas potenciais que ocorre na região norte da área de estudo devido à existência de uma concentração da exploração neste local. Também é válido observar que, apesar de haver uma redução nas cargas às margens dos rios, a queda não foi suficiente para impedir o fluxo de base.

A Figura 12 mostra o rebaixamento da superfície piezométrica (carga inicial menos a carga final) para o período de simulação quando não há exploração. O rebaixamento quando

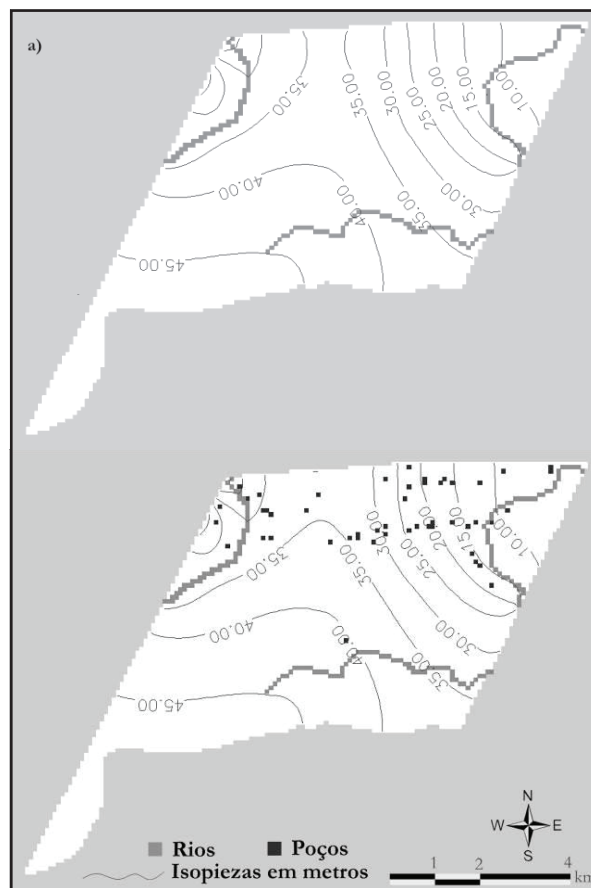


Figura 11 – Mapa potenciométrico sem (a) e com (b) exploração pelos poços

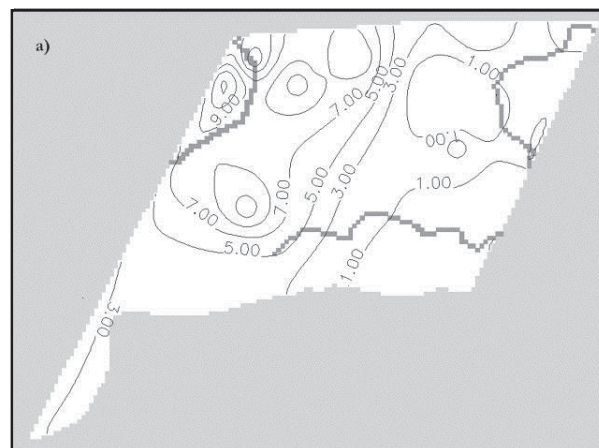


Figura 12 – Diferença entre cargas potenciais (t=0 - t=240) na simulação sem exploração

há exploração é retratado na Figura 13. É possível observar que, nas duas situações simuladas, o maior rebaixamento ocorre na região norte da área de estudo, devido, principalmente, ao escoamento para os rios. Entretanto, como a maior parte dos poços está localizada nessa região, a exploração dos poços provoca um rebaixamento ainda maior.

Com os poços bombeando, ao longo de 8 meses, à taxa acima encontrada (24.500 m³/d), o volume explorado alcança 5.890.000 m³. Este valor é um pouco maior que o potencial

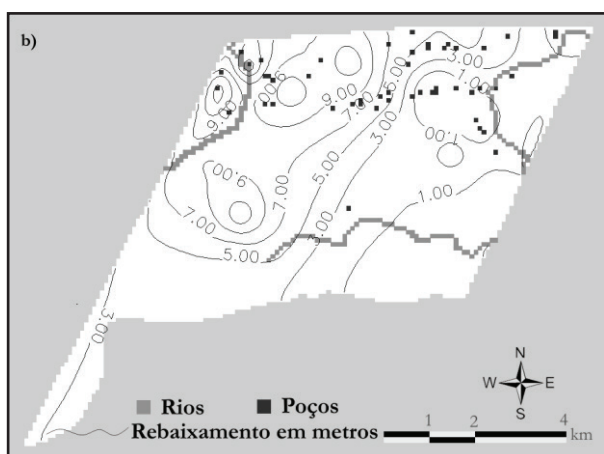


Figura 13 – Diferença entre cargas potenciais (t=0 – t=240) na simulação com exploração

estimado pela simulação em estado natural, que é de 5.500.000 m³. Além disso, como a descarga natural não está distribuída uniformemente ao longo do tempo, nos três primeiros meses, além da exploração normal média, um volume de 1.650.000 m³ poderia ser utilizado sem que houvesse danos ao aquífero. Ele é descarregado naturalmente sem consumo. Por outro lado, nos 5 meses de exploração restantes, um volume total de 2.000.000 m³ é retirado acima da potencialidade do aquífero, conforme mostra a Figura 14.

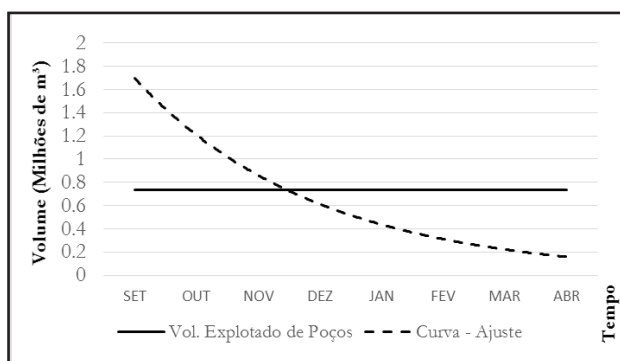


Figura 14 – Volume retirado nos poços x curva de ajuste da potencialidade

Uma das consequências dessas retiradas excessivas é a redução em quase 20% no volume de água que é descarregado da Zona 6 para outras regiões. Além disso, nos últimos meses do período estudado, há ocorrência de um déficit no balanço para as fronteiras, indicando uma inversão no sentido do fluxo, conforme detectado também por Batista et al. (2011). Portanto, é possível concluir que a exploração está afetando diretamente a recarga subterrânea da Zona 7, a de maior demanda, onde se localiza a capital, João Pessoa. Os resultados do balanço hídrico mostraram uma redução de mais de 15% na descarga de fluxo que ocorre entre as fronteiras.

De posse destes dados é possível observar que a vazão retirada atualmente encontra-se acima da capacidade de abastecimento sustentável desta área. Entretanto, as quantidades exploradas em cada poço não estão acima das respectivas capacidades de produção, mas sim, acima da capacidade pro-

ductiva do sistema aquífero. Isso indica que, admitir apenas o critério local de vazões nominais para determinar o volume a ser outorgado do poço sem analisar outros critérios a níveis regionais ou globais, não é uma forma sustentável de permitir a utilização dos recursos.

Outorga Modulada

Para a determinação das quantidades outorgáveis, propõe-se aqui uma modulação bimestral no volume, baseada na potencialidade hídrica a partir das descargas modeladas. Assim, o volume total que poderia ser retirado dos poços iria variar a cada dois meses, para que o déficit fosse o mínimo ou, até, inexistente e, conseqüentemente, não houvesse uma exploração indevida.

De posse da curva de variação temporal da potencialidade hídrica e do balanço hídrico subterrâneo da área de estudo, foi realizada a divisão em quatro períodos bimestrais onde, para cada divisão, foi admitido o menor valor da potencialidade como valor máximo a ser explorado por todos os poços da área.

A definição de um volume máximo a ser retirado em toda região deve ser realizada para atuar como um teto, evitando que seja permitida a exploração por diversos poços observando apenas a sua capacidade pontual. Assim, partindo das diretrizes gerais que o volume máximo total retirado na área de estudo durante o período de dois meses não ultrapasse a potencialidade do aquífero e que este volume máximo varie bimestralmente, foi realizada a simulação através do modelo computacional.

Os resultados do modelo mostraram que para a vazão retirada de forma modulada foi possível observar a ocorrência de valores mínimos de déficit, entre o volume consumido e o volume descarregado (Figura 15). Utilizando este método, o volume retirado corresponde a 70% da disponibilidade hídrica da região, aproximadamente 3.900.000 m³ nos oito meses estudados.

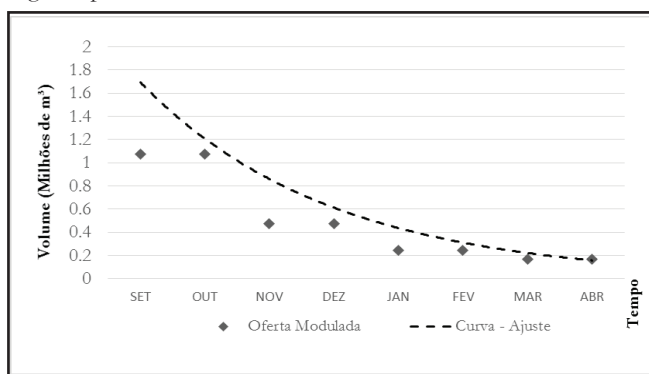


Figura 15 - Volume Descarregado e Volume Modulado retirado dos poços

A grande diferença nessa forma de exploração seria que, nos meses em que a influência da recarga estivesse presente, o volume retirado seria maior, e nos meses com uma maior influência da estiagem, esse valor diminuiria.

Com isso, as retiradas poderiam ser específicas para certos fins (Figura 16). Por exemplo, nos meses em que a oferta modulada fosse maior, esse volume poderia ser destinado para a irrigação de culturas que se adequassem melhor ao período e, quando fosse menor, esse volume deveria ser destinado a

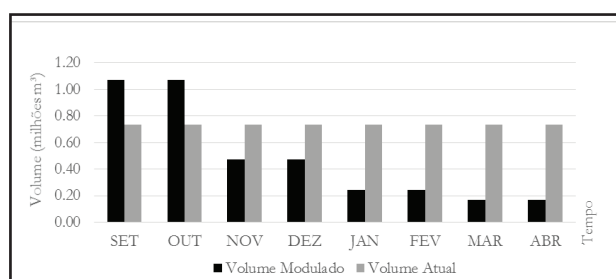


Figura 16 - Volume retirado atual e volume modulado

usos prioritários.

Com a utilização dessa diretriz para a determinação do volume outorgável, é possível obter uma redução de 93% entre o déficit que ocorre considerando as retiradas atuais e o déficit que ocorreria se as retiradas obedecessem a oferta modulada. Na comparação entre o volume atual retirado e o volume modulado há uma redução em torno de 33% no volume explorado. Essa redução é necessária de qualquer forma, pois o consumo atual está acima da disponibilidade do aquífero.

CONCLUSÕES

Apesar das dificuldades com a escassez de dados, a implantação de um modelo matemático para a simulação do aquífero apresentou resultados bastante satisfatórios. Conseguiu-se estimar as características hidrogeológicas do sistema, realizar simulações para o conhecimento sentidos de fluxo, volumes descarregados e vazões retiradas, fornecendo assim informações fundamentais para subsidiar uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos de forma mais adequada.

Determinou-se o potencial passível de exploração na região estudada e constatou-se que a atual retirada através de poços apresenta-se acima do valor sustentável que o aquífero está apto a suportar em um período seco.

Assim, os critérios adotados no Decreto Estadual Nº 19.260/97 para a determinação da vazão outorgável de águas subterrâneas devem ser considerados de forma conjunta: tanto a vazão nominal de teste de poço como também a capacidade de recarga do aquífero. Só assim pode-se conseguir uma vazão outorgável sustentável.

É proposto então um método de outorga modulada, que se baseia na determinação de um valor bimestral a ser explorado de forma que o déficit provocado seja mínimo. Os resultados mostraram uma redução de 93% no déficit, através de uma redução de apenas 33% no volume explorado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do CNPq, CAPES e FINEP (Projetos ASUB e BRAMAR), e o suporte da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AESA).

REFERÊNCIAS

- ASUB. Integração dos instrumentos de outorga, enquadramento e cobrança para a gestão das águas subterrâneas. Relatório Técnico Parcial nº2. Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2010.
- BATISTA, M. L. C.; REGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T. Modelagem do fluxo subterrâneo na bacia sedimentar costeira do Baixo Curso do rio Paraíba como subsídio à gestão de recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, p. 163-175, 2011.
- BRASIL. Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União DOU de 09 de janeiro de 1997, Seção 1, Brasília DF, 1997. p. 470-474.
- CHIANG, W.; KINZELBACH, W. *Processing Modflow. A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Berlin: Springer Verlag, 1998.
- COSTA, W. D.; ALBUQUERQUE, J. P. T. de; BRANCO, R. L. C.; MARANHÃO, C. M. L.; GOLDFABER, M. Estudo de caracterização e verificação da disponibilidade hídrica da vertente litorânea do estado da Paraíba. *Estudos Hidrogeológicos. Relatório Final. Tomo I – Texto*. Ministério da Integração Nacional, 2007.
- COSTA, M. L. M.; RIBEIRO, M. M. R.; REGO, J. C.; ALBUQUERQUE, J. P. T. Proposição de critérios de outorga para águas subterrâneas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n.1, p. 105-113, 2011.
- DIEM, S.; RENARD, P.; SCHIRMER, M. Assessing the effect of different river water level interpolation schemes on modeled groundwater residence times. *Journal of Hydrology*, v. 510, p. 393-402, 2014.
- DOHERTY, J. PEST – Model-Independent Parameter Estimation. *Watermark Numerical Computing*. 2000. 255 p.
- GILFEDDER, M.; RASSAM, D.W.; STENSON, M.P.; JOLLY, I.D.; WALKER, G.R. Incorporating land-use changes and surface-groundwater interactions in a simple catchment water yield model. *Environmental Modelling & Software*, v.38, p. 62-73, 2012.
- MAROTZ, G. *Technische grundlageneiner wasserspeicherung imm naturlichen untergrund habilitationsschrift*. Universitat Stuttgart, 1968.
- MCDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A Modular Three-dimensional Finite difference Ground-water Flow Model*. U.S. Geological Survey, 1988.
- MOHANTY, S.; JHA, K. M.; KUMARA, A.; PANDA, D.K. Comparative evaluation of numerical model and artificial neural network for simulating groundwater flow in Kathajodi–Surua

Inter-basin of Odisha. *Journal of Hydrology*, v. 495, p. 38-51, 2014.

PARAÍBA. Decreto Estadual n.º. 19.260, de 31 de outubro de 1997. Regulamenta a outorga do direito de uso dos recursos hídricos e dá outras providências, 1997.

ZHOU, Y.; LI, W. A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*, v. 2, n. 2, p. 205-214, 2011.