

FLUXO E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA EM ALUVIÃO DO SEMIÁRIDO PERNAMBUCANO PARA ABASTECIMENTO DE PEQUENAS COMUNIDADES

WATER FLOW AND STORAGE IN ALLUVIUM AT PERNAMBUCO SEMIARID FOR SUPPLYING SMALL COMMUNITIES

Wendell José Soares dos Santos 

Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) – Recife (PE), Brasil.

Anderson Luiz Ribeiro de Paiva 

Doutor em Engenharia Civil, UFPE. Professor do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental (DECIV) e do PPGEC, UFPE – Recife (PE), Brasil.

Artur Paiva Coutinho 

Doutor em Engenharia Civil, UFPE. Professor do Núcleo de Tecnologia (NT) do Centro Acadêmico do Agreste (CAA), UFPE – Caruaru (PE), Brasil.

Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral 

PhD em Engenharia Civil, Wessex Institute of Technology. Professor, Universidade de Pernambuco (UPE) e do PPGEC, UFPE – Recife (PE), Brasil.

Endereço para correspondência:

Wendell José Soares dos Santos – Avenida da Arquitetura, s/n – Cidade Universitária – CEP: 50.740-550 – Recife (PE), Brasil – E-mail: wendell_sant@hotmail.com

Recebido em: 05/12/2019

Aceito em: 01/05/2020

RESUMO

A Região Nordeste tem grande parte do seu território inserida no semiárido, que é caracterizado por níveis pluviométricos anuais relativamente baixos, e onde a situação de acesso à água é agravada nas zonas rurais com o abastecimento convencional deficitário. Uma das alternativas para essas regiões é a utilização da água subterrânea, porém muitas vezes esses mananciais são explorados sem conhecimento do seu comportamento. Para auxiliar os gestores a entender e gerenciar melhor os aquíferos, faz-se uso de modelos computacionais que representam a situação do ambiente real. O presente trabalho objetivou avaliar o acúmulo de água na aluvião em um trecho de rio dessa região e desenvolver um modelo numérico de fluxo subterrâneo do meio poroso. Foram realizados testes de infiltração com o método Beerkan em três pontos da área de estudo com coletas para análise granulométrica do solo, onde foi possível obter a curva granulométrica e os parâmetros hidrodinâmicos e construir as curvas de infiltração, de retenção de água e de condutividade hidráulica do solo. Caracterizou-se o solo como preponderantemente arenoso, com tempo de infiltração variando com a profundidade, e seus valores médios de condutividade hidráulica e de umidade saturada foram de $1,84 \times 10^{-4}$ m/s e 0,44, respectivamente. O solo apresentou baixa capacidade de retenção para os pontos ensaiados. Construiu-se um modelo da aluvião utilizando o programa computacional Visual MODFLOW, e, com o monitoramento dos níveis de água, alcançou-se um modelo numérico satisfatório. Os resultados obtidos por mapas potenciométricos de cargas hidráulicas ajustaram-se às observações. Também foi possível observar o rebaixamento do lençol freático, apresentando situação crítica em cenários futuros, com o prolongamento da estiagem.

Palavras-chave: visual MODFLOW; método Beerkan; modelo numérico.

ABSTRACT

The Northeastern region has a large part of its territory inserted in the semiarid region, which is characterized by relatively low annual rainfall levels and where the situation of access to water is aggravated in rural areas with deficient conventional supply. One of the alternatives for these regions is the use of groundwater, but these springs are often exploited without knowledge of their behavior. In order to help managers better understand and manage aquifers, computational models are used, which represent the situation of the real environment. The present work aimed to evaluate the accumulation of water in the alluvium in a river stretch in this region, and to develop a numerical model of underground flow of the porous medium. Infiltration tests were performed with the Beerkan method at three points in the study area, with collections for granulometric analysis of the soil, where it was possible to obtain: the granulometric curve, the hydrodynamic parameters and to build the infiltration, water retention, and hydraulic conductivity curves. The soil was characterized as predominantly sandy, with infiltration time varying with the depth, where the average value of hydraulic conductivity and saturated humidity was 1.84×10^{-4} m/s and 0.44, respectively. The soil presented a low retention capacity for the tested points. An alluvial model was built using the Visual Modflow software and the monitoring of water levels was achieved with a satisfactory numerical model. The results obtained by potentiometric maps of hydraulic heads adjusted the observations. It was also possible to observe a lowering of the water table, presenting a critical situation in future scenarios with the prolongation of the drought.

Keywords: visual MODFLOW; Beerkan method; numerical model.

INTRODUÇÃO

Problemática e justificativa

Na área de recursos hídricos, existe o grande desafio para os próximos anos de garantir o atendimento das demandas na quantidade necessária e com a qualidade apropriada, além da preservação das águas, que vem sofrendo grandes prejuízos em virtude da poluição descontrolada (TEIXEIRA; PORTO, 2018).

O desenvolvimento da agricultura e da indústria e a diversificação dos usos múltiplos da água trouxeram novos tipos de apropriação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, produzindo estresse hídrico (conflito crescente entre os diversos usos da água) ou a escassez de água (desequilíbrio entre disponibilidade e demanda) (TUNDISI, 2014).

Segundo Costa e Cirilo (2011), o Brasil apresenta uma disponibilidade hídrica privilegiada, possuindo mais da metade da água da América do Sul e 13,8% do total mundial, porém tem problemas como a má distribuição desses recursos, sendo afetado tanto pela escassez quanto pela abundância, bem como pela degradação dos recursos hídricos por meio da poluição doméstica e industrial.

A região semiárida brasileira é cada vez mais impactada pela escassez de água, e simultaneamente o crescimento econômico alavancado pelo setor agrícola depende diretamente de água para irrigação (SILVA; FIGUEIREDO; MORAES, 2015). Segundo Montenegro et al. (2005), ela enfrenta cenários de secas frequentes, distribuição irregular de terras e pobreza rural. A média da precipitação total anual está em torno de 500 mm, dos quais cerca de 80% ocorrem em um pequeno intervalo de tempo de quatro meses (denominado quadra chuvosa).

Pernambuco é o estado brasileiro que apresenta a menor disponibilidade *per capita* de água do país, situação agravada por 90% de seu território estar situado no semiárido (ANA, 2002). A pouca chuva concentra-se em alguns meses do ano, e a evaporação dificulta a conservação da água acumulada nos açudes. Situação caótica estabelece-se nas populações rurais difusas, onde a fonte de água deve ser local, por ser inviável um sistema de abastecimento de água por canalização, como acontece em áreas urbanas. A captação em poços escavados em aluviões ou o complemento das barragens subterrâneas são uma alternativa para o acesso a água,

principalmente durante períodos de estiagem (SANTOS; PAIVA; SILVA, 2016), porém captam a água sem conhecer quanto o manancial pode oferecer e como otimizar a conservação dessa água, além de não testarem alternativas de captação.

À vista disso, compreender como se comporta o fluxo nos depósitos aluvionares se torna fundamental para melhor gerenciamento desse recurso disponível. Uma ferramenta utilizada para estudar o meio subterrâneo e entender o seu comportamento é a criação de modelos computacionais capazes de representar o meio real, podendo objetivar a interpretação e previsão, como avaliar se haverá quantidade suficiente de água e até sua qualidade.

Existem diversos programas computacionais que desenvolvem modelos matemáticos de fluxo subterrâneo, sendo o MODFLOW a referência mundial. Diferentes programas computacionais foram desenvolvidos com o uso do código computacional MODFLOW, em diversos países, como mostram as pesquisas de Lukjan, Swasdi e Chalermyanont (2016), Xi-Yang, Feng e Yan (2018), Khat-tabi et al. (2018), Sathish, Mohamed e Klammler (2018), Fang et al. (2019), Mao et al. (2019), Klaas et al. (2020), Ochoa et al. (2020) e Zeinali, Azari e Heidari (2020).

Mooers et al. (2018) usaram MODFLOW em uma região desértica árida na bacia de Chuckwalla, nos Estados Unidos da América (EUA), para determinar a recarga natural do aquífero e avaliar o fluxo subterrâneo sob bombeamento, sendo observados grandes gradientes hidráulicos e uma lenta recuperação da água subterrânea.

Ehtiat, Mousavi e Srinivasan (2018) desenvolverem um modelo do sistema aquífero Dehloran, localizado na árida região oeste do Irã, integrando o SWAT para estimativa de recarga com MODFLOW, a fim de avaliar o comportamento do fluxo subterrâneo diante das mudanças no uso do solo, no sistema de irrigação e nos bombeamentos, mostrando a importância do desenvolvimento da modelagem integrada para a interação de águas superficiais e subterrâneas.

Uma abordagem integrada do MODFLOW, do Sistema de Informação Geográfica e do modelo de elevação digital foi explorada por Rossman, Zlotnik e Rowe (2019) para simular a dinâmica de milhares de lagos alimen-

tados por água subterrânea em região semiárida nos Sand Hills, em Nebraska (EUA), sob as mudanças de recargas gerenciadas.

D’Oria e Zanini (2019) avaliaram a heterogeneidade hidráulica do aquífero aluvial sob uma barragem contra inundações e sua área à jusante no norte da Itália. Utilizaram o MODFLOW para analisar a interação rio-aquífero em diferentes cenários de inundações. Assim, uma região que vem sofrendo há muito com a escassez de água, decorrente do período de estiagem de 2012 até 2019, é a zona rural de Santa Cruz do Capi-

baribe, em Pernambuco, que se localiza no trecho superior da bacia do rio Capibaribe, desde a barragem de Poço Fundo até próximo à zona urbana, onde a população ribeirinha faz uso da água armazenada na aluvião, que é usada principalmente para a dessedentação de pequenas criações de animais e também para a agricultura familiar. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar o acúmulo de água e o comportamento do fluxo subterrâneo em um trecho do alto rio Capibaribe, no semiárido pernambucano, para melhor gerenciamento do recurso hídrico disponível na área de estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo está localizada na bacia hidrográfica do rio Capibaribe (Figura 1), mais precisamente no alto rio Capibaribe. Seu trecho possui extensão de 79 quilô-

metros, entre as primeiras nascentes, em Poção (PE), e a cidade de Santa Cruz do Capibaribe. Assim, abrange quatro municípios: Poção, Jataúba (PE), Brejo da Ma-

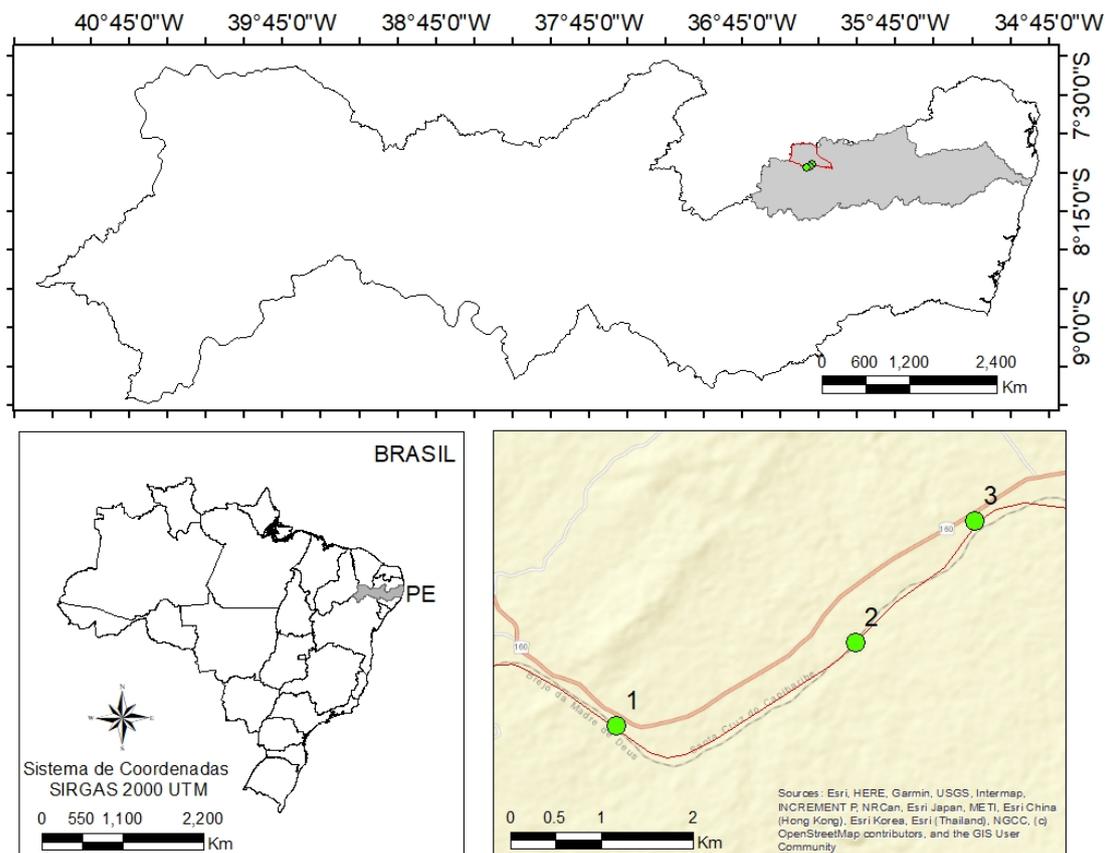


Figura 1 – Localização da área de estudo no trecho superior da bacia do rio Capibaribe.

dre de Deus (PE) e Santa Cruz do Capibaribe, todos no Polígono das Secas (PAIVA *et al.*, 2014).

O projeto Águas de Areias, desenvolvido na bacia do alto rio Capibaribe, dividiu sua extensão em três trechos. O trecho da nascente até a área inundável da barragem de Poço Fundo (Trecho 1 no projeto, com extensão de cerca de 60 km) tem características de brejo de altitude e apresenta melhores condições de acúmulo da água, sendo uma área de maior exploração para agricultura. O Trecho 2, com 10 km de extensão, é a área inundável da barragem Poço Fundo e

Método Beerkan

A aplicação da metodologia Beerkan, descrita por Souza (2005), encontra-se dividida em duas etapas: os testes de infiltração e a coleta de amostras e os ensaios de laboratório.

No trabalho experimental, objetivou-se medir as propriedades físico-hídricas em três pontos selecionados no trecho da área de estudo em profundidades diferentes em cada ponto, para a análise da variabilidade espacial desses solos. Os pontos foram selecionados de forma aproximadamente equidistante, a fim de se ter melhor representatividade da área, sendo o Ponto 1 (P1) (794.215 m E e 9.118.453 m S UTM) mais à montante do rio, o Ponto 2 (P2) (796.732 m E e 9.119.472 m S UTM) na região intermediária e o Ponto 3 (P3) (798.549 m E e 9.120.967 m S UTM) mais a jusante (Figura 2). Aproveitando o relevo do solo, os ensaios foram realizados no Ponto 1 na superfície e nas profundidades de 0,30 e 0,60 m, no Ponto 2 nas profundidades de 0,70 e 3,00 m e no Ponto 3 apenas na profundidade de 3,80 m.

Realizaram-se ensaios de infiltração aplicando-se o método Beerkan e coletas de solos em cada ponto de ensaio (Figura 3). O ensaio realizado consistiu em um

Monitoramento dos níveis de água

Para o acompanhamento dos processos de fluxo subterrâneo, faz-se necessário um monitoramento quantitativo dos níveis de água. Realizou-se o monitoramento mensal, com medidor de nível com sensor elétrico, durante dez

Modelagem da área de estudo

A área modelada está localizada em Santa Cruz do Capibaribe, inserida geograficamente na bacia do rio Capibaribe. É uma região plana em altitudes elevadas (cotas variando de 440,0 a 450,0 m), entrecor-

não possui poços amazonas. Nessa área faz-se uso da água superficial diretamente na barragem, e é necessário buscar água em maiores distâncias nos períodos de seca. O Trecho 3, com cerca de 9 km de extensão, possui boa aluvião para exploração de água; dessa forma, praticamente todos os moradores às margens do rio possuem seu poço amazonas (PAIVA *et al.*, 2015). A presente pesquisa situou-se exclusivamente no Trecho 3 do alto Capibaribe, que começa logo após a barragem de Poço Fundo e vai até as proximidades da zona urbana da cidade de Santa Cruz do Capibaribe.

simple teste de infiltração tridimensional com carga de superfície positiva (*hsup*), executado com um infiltrômetro de anel simples de 15 cm de diâmetro. Nos pontos, foram coletadas amostras de solo, deformadas e indeformadas, para determinação da umidade (inicial e final), densidade, porosidade, curva de retenção da água no solo e curva de distribuição do diâmetro das partículas. As amostras indeformadas foram retiradas por meio do extrator de Uhland com cilindros de policloreto de vinila de 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura para o cálculo da massa específica do solo. Esses valores foram utilizados para a aplicação da metodologia Beerkan.

Após os ensaios de campo, foram determinados os parâmetros do solo em laboratório. As amostras de solo coletadas foram levadas ao Laboratório de Física do Solo do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, para determinação da umidade gravimétrica inicial e final e da massa específica do solo.

A análise granulométrica foi realizada a fim de identificar o solo com base nas partículas que o constituem, a qual consistiu em conhecer a distribuição granulométrica dos grãos do solo.

meses, observando as possíveis variações sazonais em três poços amazonas de captação já existentes no local. Na Tabela 1, podem-se observar os dados dos poços monitorados, e na Figura 4, observa-se o Poço de Observação 2.

tada pelo rio Capibaribe. Constitui um retângulo de 3,15 por 5,65 quilômetros, limitado pelas coordenadas UTM 794.000 m a 799.650 m E e 9.118.300 m a 9.121.450 m S (Figura 2).

Características do modelo

A área de estudo é composta de uma aluvião de 6 km ao longo do leito seco do rio Capibaribe. Por meio de um levantamento altimétrico feito com sistema de posicionamento global geodésico por todo o eixo da

aluvião, Cabral *et al.* (2016) avaliaram a topografia longitudinal que pode ser observada na Figura 5, cuja extensão vai de 0 m (ponto mais a jusante) a 6 km (ponto mais à montante), com cota variando de 443 a 450 m.



Figura 2 – Localização dos pontos do teste de infiltração.



Figura 3 – Teste de infiltração para aplicação do método Beerkan.

Tabela 1 – Localização e dados dos poços monitorados.

Poço	Coordenadas (UTM)		Diâmetro (m)	Profundidade (m)	Cota (m)
1	7°57'56,0" S	36°19'55,5" O	3,40	3,75	452,64
2	7°57'26,5" S	36°18'30,8" O	1,50	3,60	450,83
3	7°56'43,4" S	36°17'48,6" O	1,50	3,20	446,23

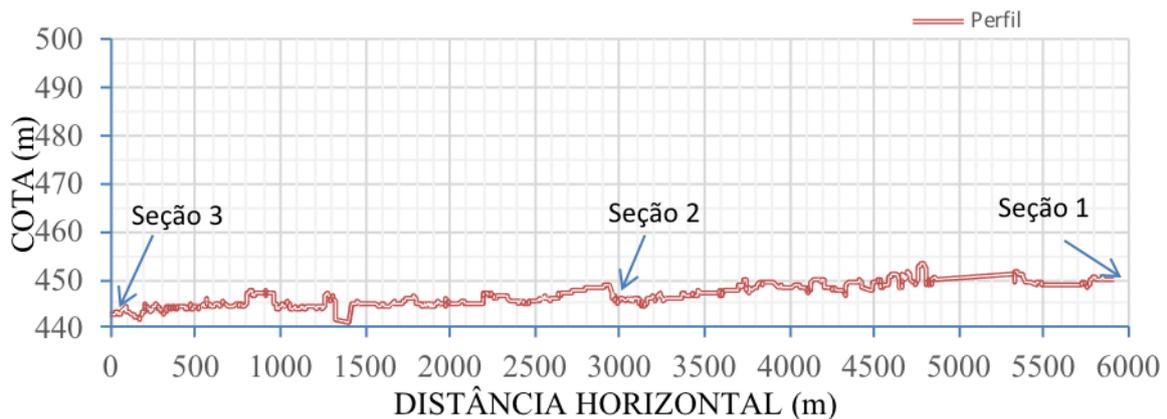
Cabral *et al.* (2016) também realizaram o levantamento em três seções transversais, escolhidas de modo a caracterizar as extremidades e a região intermediária do trecho. A extremidade mais à jusante (Seção 3) possui largura aproximada de 120 m; já a região intermediária (Seção 2) e a extremidade mais à montante (Seção 1) possuem 50 m de largura, aproximadamente. Observou-se que no trecho da área estudada, na região mais a jusante, a aluvião tem es-

pesura em torno de 3 m. No meio do trecho o valor médio para a espessura é de 3,70 m. Já na região mais à montante a média é de 3,40 m.

No modelo computacional, como foi observado que a aluvião é basicamente constituída de unidades arenosas, considerou-se um sistema com uma única camada, estando limitada superiormente pela superfície da aluvião e inferiormente pelo embasamento cristalino.



Figura 4 – Poço de Observação 2, em momento de monitoramento.



FORNE: CABRAL ET AL. (2016).

Figura 5 – Perfil longitudinal altimétrico da aluvião do Trecho 3 do alto rio Capibaribe.

As cotas de superfície do terreno foram tomadas pela interpolação linear do perfil litológico apresentado na Figura 5. Já as cotas para base do aquífero foram tomadas analisando as espessuras médias consideradas por Silva (2015), e também se realizou uma interpolação dos valores de espessura entre a região mais à montante para a região intermediária, e desta para a região mais a jusante.

Para a construção do modelo de fluxo é necessária a resolução da Equação 1, que representa o fluxo do meio poroso.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R_v = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Em que:

R_v = o fluxo volumétrico por unidade de volume (fontes ou sumidouros);

K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} = a condutividade hidráulica nas direções principais (com isso, o tensor de condutividade hidráulica reduz-se a três componentes);

Discretização do modelo

O modelo conceitual foi discretizado em uma malha constituída de 74 linhas e 122 colunas, com total de 9.028 células de dimensões 50 x 50 m, 25 x 25 m e 25 x 50 m (Figura 6).

Foram encontrados 43 poços registrados no Trecho 3 do alto rio Capibaribe, conforme as informações dos poços retiradas do Projeto Águas de Areia (PAIVA *et al.*, 2014). No entanto, ao refinar as informações dos 43 poços existentes, alguns se encontram inativos, outros não se encontram no leito do rio, e sobre outros não se tinham informações. Desse modo, foram utilizados 28 poços, sobre os quais foi possível obter informações mínimas para inserção no modelo. A Figura 6 mostra em três dimensões os poços inseridos na aluvião no modelo construído. Porém houve a necessidade de inserir poços adicionais que representassem as vazões dos poços sobre os quais não se tinham informações, mas que contribuíam para as retiradas de água na aluvião. Assim, foram inseridos cinco poços, distribuídos ao longo da aluvião, onde se estimaram as vazões dos diversos poços que influenciavam no fluxo do aquífero.

S_s = o coeficiente de armazenamento específico.

Existem vários programas para resolução da Equação 1, sendo o MODFLOW (modelo de fluxo de água subterrânea em diferenças finitas modular) o mais conhecido. Segundo McDonald e Harbaugh (1988), MODFLOW é um programa de computador que simula o fluxo de água subterrânea tridimensional por um meio poroso usando um método de diferenças finitas. Ele foi desenvolvido pela United States Geological Survey em 1984, e com o decorrer dos anos foram surgindo outras versões, como MODFLOW-88 e MODFLOW-96, nas quais novos pacotes para gerenciamento do modelo foram adicionados. Ao longo dos anos novas atualizações foram lançadas.

O programa computacional utilizado para a construção do modelo foi o Visual MODFLOW, programa comercial, apresentando visualização dos resultados em 2D e 3D. Ele utiliza o código MODFLOW e permite a utilização de pacotes adicionais, possuindo interface gráfica de fácil utilização, que é dividida em três seções: entrada, execução e saída.

Para os valores de vazão que é extraída de cada um, considerou-se um volume referente à evaporação nos poços que não possuíam tampa, visto que a área do poço descoberto está sujeita à evaporação potencial na região. Consideraram-se os valores de evaporação potencial obtidos no Projeto Águas de Areia no ano de 2015 (Tabela 2).

As cargas hidráulicas iniciais foram obtidas com medidas de níveis estáticos dos poços de observação e interpoladas linearmente onde não se tinham medidas (Figura 7). Relativo às condições de contorno, considerou-se o aquífero aluvial como: livre, homogêneo e isotrópico.

Como as fronteiras laterais são definidas pelo contato aquífero aluvial–cristalino, as células situadas no cristalino recebem o *status* de inativas (células verdes-lodo), pois não há fluxo, enquanto as situadas no aquífero aluvial recebem o *status* de ativas (células brancas), uma vez que há condição de fluxo. A recarga em uma das fronteiras permeáveis é considerada, assim como a ocorrência de fluxo atravessando a outra fronteira (Figura 8).

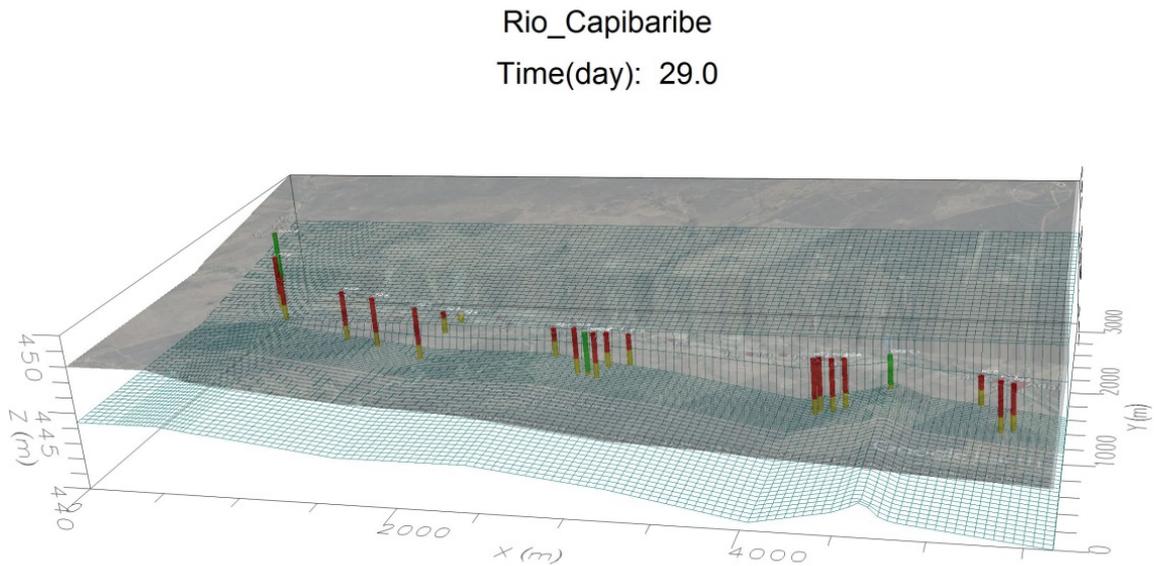


Figura 6 – Imagem tridimensional do modelo com indicação dos poços inseridos na área de estudo.

Tabela 2 – Dados de evaporação potencial no ano de 2015 na área de estudo.

Mês	Evaporação potencial (mm)
Janeiro	200,8
Fevereiro	168,7
Março	170,8
Abril	153,9
Maio	136,1
Junho	65,0
Julho	62,7
Agosto	106,0
Setembro	151,2
Outubro	180,9
Novembro	205,5
Dezembro	189,1
Total	1421,2

FONTE: BRAGA ET AL. (2016).

Nas fronteiras permeáveis de montante e jusante, as células ativadas são definidas com cargas hidráulicas constantes durante um período de simulação e que mudam de um período a outro. Antes de definir o valor de carga hidráulica nessas células, verificou-se se este era maior que a cota do embasamento cristalino. Caso contrário, essa carga não era considerada, pois a célula estava seca (Figura 8).

Quanto à recarga, foram coletados os dados de precipitação da Agência Pernambucana de Águas e Climas (APAC, 2017) entre janeiro e dezembro de 2016 (Tabela 3) do posto de Jataúba (120), que se situa à montante da área de estudo, sendo o que melhor representa o trecho estudado.

Quanto aos parâmetros hidrodinâmicos, a condutividade hidráulica saturada foi obtida pela metodologia BEST. Consideraram-se para o modelo uma condutividade hidráulica de $1,84 \times 10^{-4}$ m/s, o armazenamento específico de 1×10^{-5} m⁻¹, a porosidade eficaz de 0,2 e o rendimento específico de 0,2.

O tempo de partida (tempo = 0 dia) para a modelagem foi 17 de março de 2016, sendo simulado até 24 de janeiro de 2017 (tempo = 313 dias). Esse é um período razoável para o estudo do problema, no qual se dispunha de informações dos níveis de água dos poços observados.

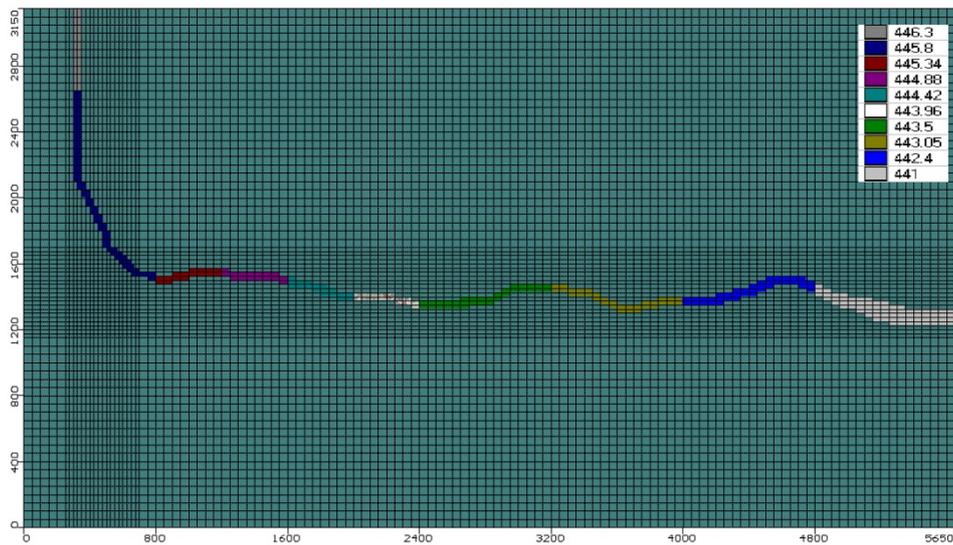


Figura 7 – Cargas hidráulicas iniciais do modelo computacional em metros.

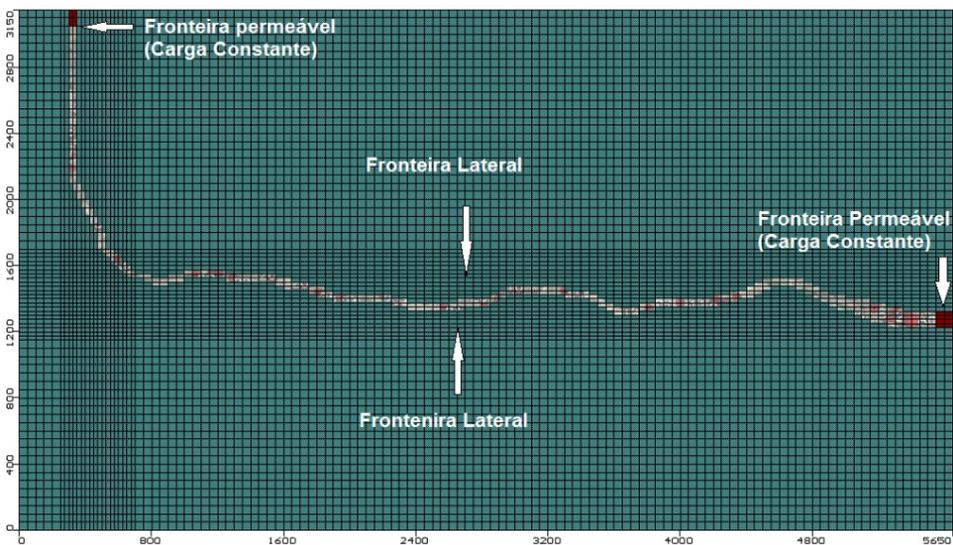


Figura 8 – Condições de contorno para o modelo.

Com o modelo já construído, realizou-se a simulação para compreender o comportamento do fluxo de água subterrânea, e os resultados do modelo foram comparados com os dados de campo para analisar a representatividade do modelo.

Com o modelo já calibrado foram simulados cenários futuros, considerando que o sistema perma-

neceu nas mesmas condições de bombeamento e que não houve precipitação para analisar situações críticas de estiagem. Dessa forma foram definidos dois cenários:

- um ano depois (até dezembro de 2017);
- três anos depois (até dezembro de 2019).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características físicas do solo

Os resultados dos ensaios de granulometria do conjunto de amostras dos três pontos (P1, P2 e P3) estão representados na Tabela 4, com as suas respectivas porcentagens de areia, silte e argila. Foram classificados de acordo com o diagrama triangular (USDA, 1967), que é adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência dos Solos. Podem-se observar as seis amostras plotadas na Figura 9 de acordo com suas classes texturais, que se distribuíram entre franco-arenoso, areia franca e areia.

Na Figura 10 é apresentada a curva granulométrica nos três pontos ensaiados. Verifica-se que as classificações

granulométricas são semelhantes, pois as frações granulométricas em areia/silte/argila apresentam pouca variabilidade. Nos três pontos estudados, observa-se que as porcentagens de areia apresentam percentual maior que 80%, com exceção da amostra superficial no Ponto 1. Além disso, nota-se que as curvas granulométricas para as profundidades apresentam formatos similares. Essa condição da curva indica que as amostras apresentam características texturais semelhantes, sugerindo que quase não existe heterogeneidade textural da aluvião ao longo da profundidade. Tal condição é uma característica das aluviões.

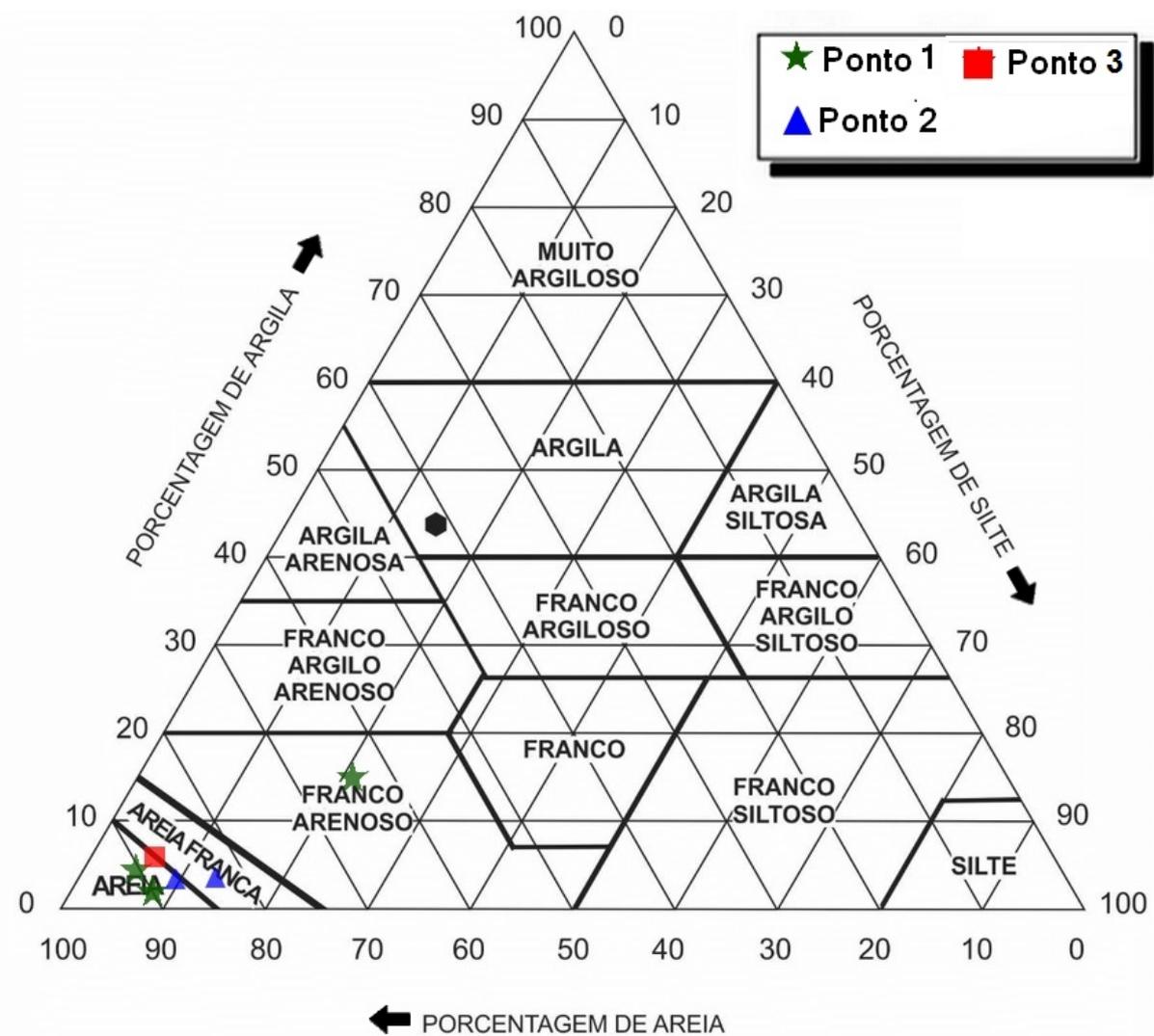
Tabela 3 – Dados de precipitação da área de estudo, Posto 20 Jataúba (PE), no ano de 2016.

Mês	Precipitação (mm)
Janeiro	146
Fevereiro	25
Março	15
Abril	0
Maió	14
Junho	11
Julho	0
Agosto	0
Setembro	1
Outubro	0
Novembro	0
Dezembro	4
TOTAL	216

FONTE: APAC (2017).

Tabela 4 – Percentuais de areia, silte e argila nos três pontos analisados.

	Profundidade (m)	% Areia	% Silte	% Argila	Classificação
Ponto 1	Superficial	65,68	20,25	14,07	Franco-arenoso
	0,30	89,71	5,60	4,69	Areia
	0,60	90,52	4,79	4,69	Areia
Ponto 2	0,70	80,26	15,05	4,69	Areia Franca
	3,00	89,06	7,42	3,52	Areia
Ponto 3	3,80	89,65	5,67	4,69	Areia



FONTE: ADAPTADO DO DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DOS ESTADOS UNIDOS (1967).

Figura 9 – Triângulo textural do solo.

Comportamento do solo nos ensaios de infiltração

As curvas de infiltração são ilustradas na Figura 11. Percebe-se que os tempos de infiltração variam em função das classes texturais e estruturais do fluxo de água. A duração média do ensaio no solo tipo franco-arenoso foi de

4.248 segundos para uma lâmina de 71,3 mm. Na areia franca foi de 793 segundos para o total de 118,84 mm de lâmina acumulada média, e na areia foi de 353 segundos para uma lâmina acumulada média de 108,2 mm.

Método Beerkan

Só foi possível executar o modelo BEST no Ponto 3 na profundidade de 3,80 m e no Ponto 2 na profundidade de 0,70 m. Nas outras profundidades e no Ponto 1 não foi possível em razão do tempo de infiltração, que foi muito rápido.

Os parâmetros de forma da curva de retenção e da curva de condutividade hidráulica, que dependem da textura do solo para a área de estudo, são apresentados na Tabela 5. O parâmetro n relaciona-se com a distri-

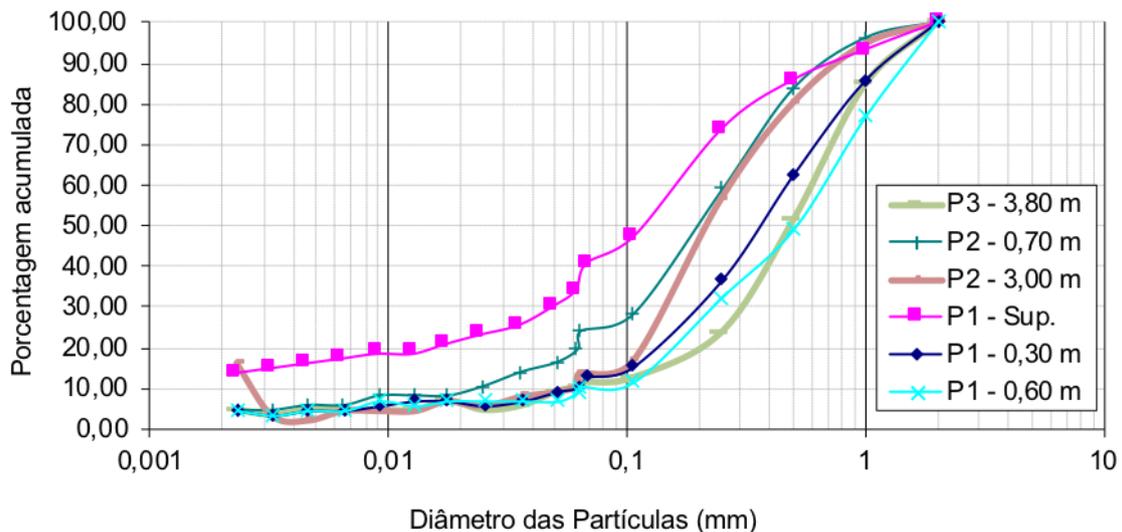


Figura 10 – Curva de distribuição do tamanho das partículas para os três pontos analisados.

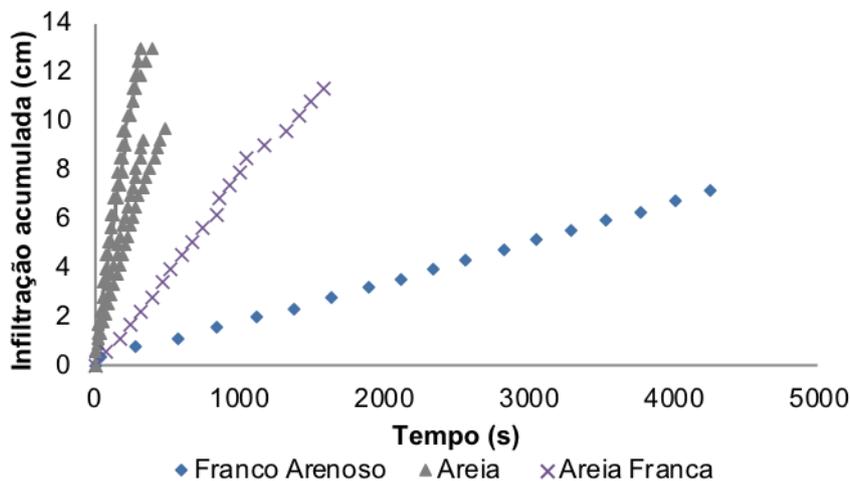


Figura 11 – Infiltração acumulada em função do tempo.

buição granulométrica. Assim, quanto mais uniforme for o solo, maior será o valor de n (VAN GENUCHTEN, 1980). Verifica-se que os valores de n para os dois pontos foram semelhantes, visto que os ambos têm uma porcentagem de areia similar. Nota-se que os resultados obtidos para os parâmetros de forma estão dentro dos valores obtidos para solos com as mesmas classes texturais apresentados por Furtunato *et al.* (2013) e Souza *et al.* (2008a).

As propriedades hidráulicas obtidas pela metodologia Beerkan são explicitadas na Tabela 6. Os valores obtidos para a umidade saturada variaram de 0,42 a 0,46, e para a umidade residual o valor foi igual a zero. Esses valores encontram-se na faixa encontrada por Souza *et al.* (2008b).

Observa-se, na Tabela 6, que os valores de S e K_s aumentam em função do teor de areia. Os valores de K_s encontram-se na faixa de $3,1 \times 10^{-4}$ m/s para o Ponto 3 (3,80 m) e de $6,0 \times 10^{-5}$ m/s para o Ponto 2 (0,70 m), que correspondem aos valores típicos de permeabili-

dade média de areia sugerida por Souza *et al.* (2008a) e Santos, Silva e Silva (2012).

Após obter os parâmetros de forma e de normalização, construíram-se as curvas de retenção de água (Figura 12A) e de condutividade hidráulica (Figura 12B) referentes aos dois pontos, sendo possível executar o modelo BEST. Para cada curva de condutividade hidráulica, os valores obtidos estiveram em função dos valores calculados na curva de retenção. Essas curvas estão apresentadas na Figura 12B para o Ponto 1 na profundidade de 3,80 m (areia) e para o Ponto 2 na profundidade de 0,70 m (areia franca).

As curvas de retenção representam a relação funcional entre a quantidade de água e um volume de solo em equilíbrio com a tensão aplicada (Figura 12A). Logo após a saturação, as curvas apresentam um ponto de inflexão. Esse ponto corresponde ao valor do potencial de entrada de ar (h_g) na matriz porosa do solo (SOUZA *et al.*, 2008a).

Tabela 5 – Parâmetros de forma das funcionais de $h(\theta)$ e $K(\theta)$.

	Profundidade (m)	Classificação (USDA)	M	n	η	C_p
Ponto 2	0,70	Areia Franca	0,16	2,37	8,39	2,04
Ponto 3	3,80	Areia	0,10	2,23	11,69	2,26

Tabela 6 – Propriedades hidráulicas do solo para os Pontos 3 e 2.

	Profundidade (m)	Classificação (USDA)	θ_r (cm ³ /cm ³)	θ_s (cm ³ /cm ³)	h_g (mm)	S (mm/s ^{0,5})	K_s (mm/s)
Ponto 2	0,70	Areia Franca	0	0,42	-53,56	1,62	0,06
Ponto 3	3,80	Areia	0	0,46	-29,06	3,06	0,31

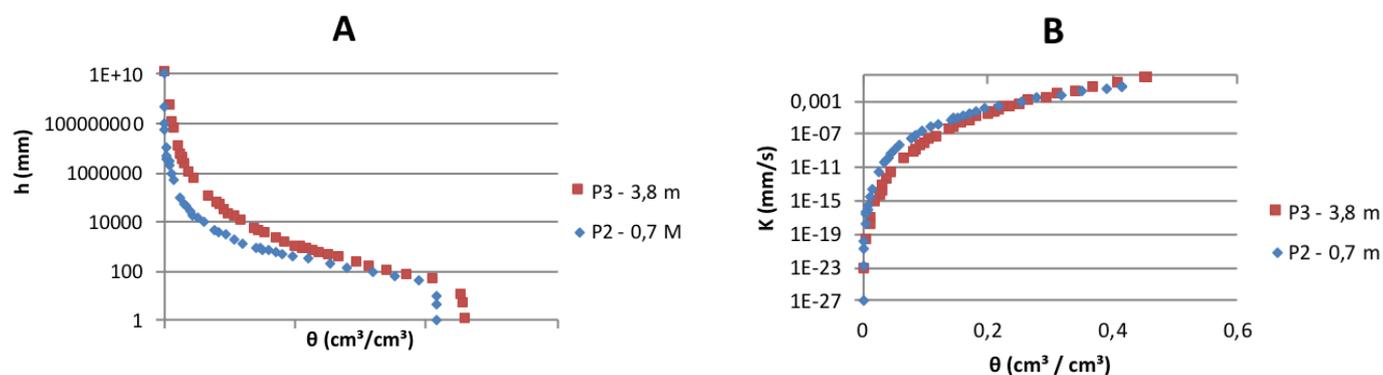


Figura 12 – Curvas de (A) retenção de água e de (B) condutividade hidráulica para os pontos 2 e 3.

Observa-se que o comportamento das curvas de retenção na areia no Ponto 3 e na areia franca no Ponto 2 são similares, apresentando baixa capacidade de retenção, segundo Souza *et al.* (2008a). Para essas classes texturais a capacidade de retenção é menor, como foi observado.

Com relação às curvas de condutividade hidráulica nos dois pontos, nota-se que possuem com-

Monitoramento dos níveis de água

As cotas dos níveis de água dos poços ao longo dos dez meses de monitoramento são apresentadas na Figura 13. Como a precipitação no ano de 2016 não foi considerável, e as retiradas nos poços pelos ribeirinhos foram contínuas, é observado o rebaixamento nos níveis

Modelo numérico

Após alguns ajustes no modelo da área de estudo, foi alcançado um modelo satisfatório. A informação dos valores bombeados precisou ser melhorada, pois inicialmente não se consideraram todos os poços sendo usados, nem as condições de contorno. Essas são informações estimadas no modelo. Os resultados das cargas hidráulicas calculadas pelo modelo aproximaram-se dos observados em campo, onde os erros associados foram da ordem de 0,3 m. O rebaixamento nos poços do modelo foi ligeiramente inferior ao observado em campo.

portamento bastante parecido em virtude da semelhança nas classes texturais. De acordo com a Figura 12B, a curva de condutividade hidráulica apresenta valores baixos quando $\theta \leq 0,30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Com base nesse valor, à medida que o teor de umidade aumenta, aumenta-se também a condutividade hidráulica do solo.

dos três poços de observação. Sendo o Poço 3 (mais a jusante) o que sofreu maior rebaixamento. Os dados mostram um rebaixamento de 14,4 cm por mês no Poço 3, que está mais a jusante, e de 10 cm para os outros dois poços.

O fluxo do meio poroso se deu no sentido de escoamento do rio, como esperado. As cargas hidráulicas na aluvião foram mais elevadas à montante do trecho (esquerda) e diminuem ao longo do trecho estudado, chegando a cotas mais baixas a jusante (direita). Pode-se observar esse comportamento no perfil longitudinal da aluvião na Figura 14, no qual é observado também que a lâmina de água aos 154 dias foi superior à lâmina de água aos 313 dias de simulação, mostrando o rebaixamento do lençol freático.

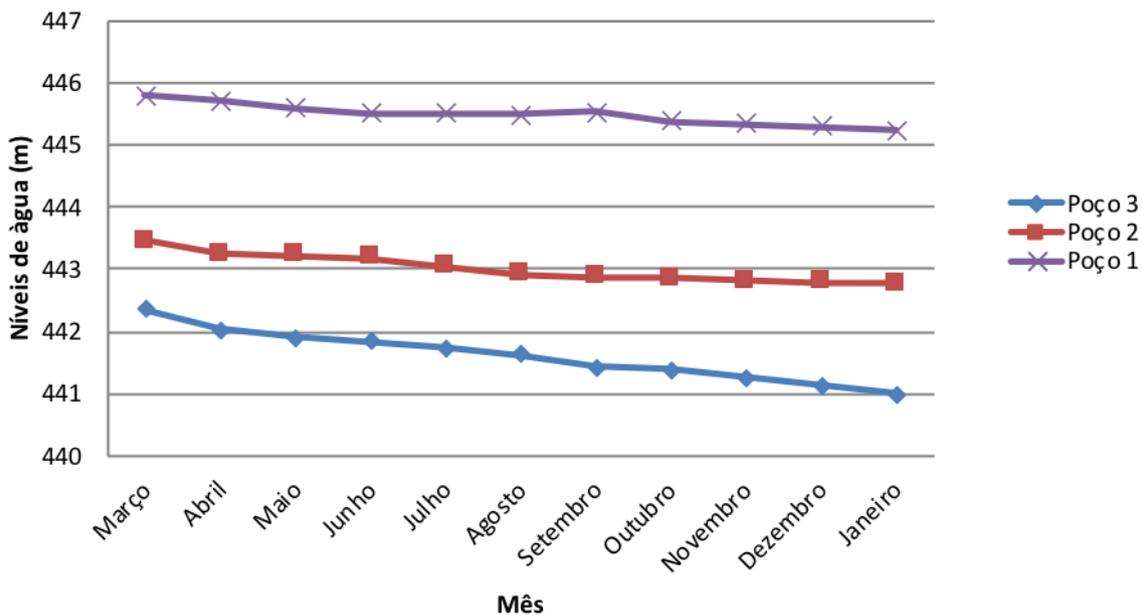


Figura 13 – Níveis de água dos poços monitorados de março de 2016 até janeiro de 2017.

As Tabelas 7 e 8 apresentam o balanço hídrico final ao fim dos dias 154 e 313, respectivamente. Observa-se que as vazões bombeadas diminuíram ao final dos 313 dias, como esperado pelo período de pouca precipitação. Consequentemente, com o rebaixamento do lençol freático, os poços que têm menor profundidade de captação passaram a não dispor mais de água.

Quanto à simulação de cenários, pode-se observar os balanços hídricos nas Tabelas 9 e 10 para os ce-

nários 1 e 2, respectivamente. Verifica-se que, para dezembro de 2017, as vazões dos poços diminuíram quando comparadas com dezembro de 2016, provavelmente também por conta do rebaixamento do lençol freático, comprometendo assim a captação dos poços mais rasos. Em dezembro de 2019, pode-se notar que a aluvião possivelmente não terá mais volume armazenado, pois as vazões dos poços são praticamente nulas.

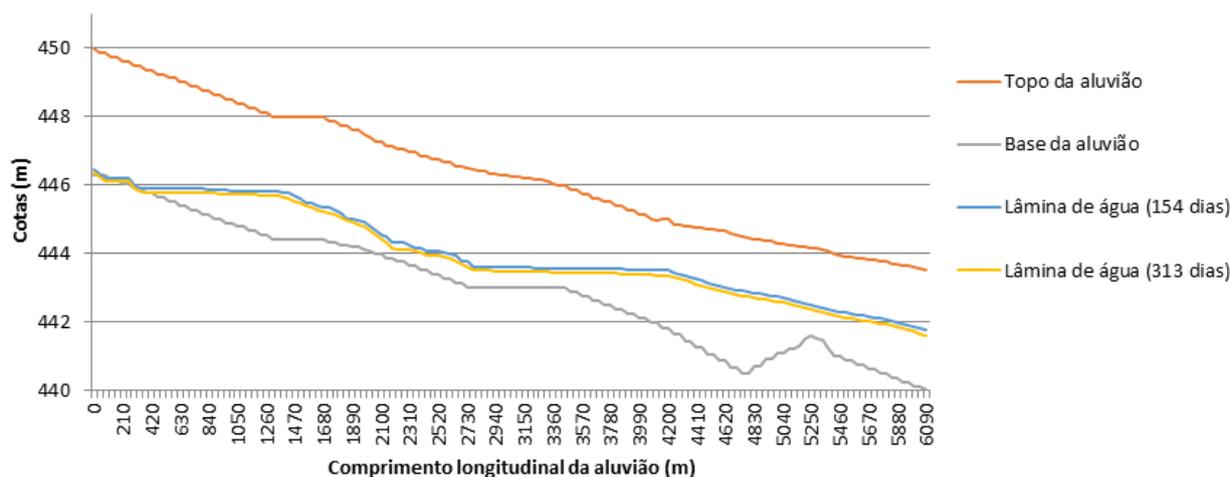


Figura 14 – Perfil longitudinal da aluvião com as lâminas de água aos 154 e 313 dias de simulação.

Tabela 7 – Balanço hídrico ao final dos 154 dias de simulação.

Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)
Poços = 42,292	Armazenamento = 55,804
Contorno dependendo da carga = 15,381	Contorno dependendo da carga = 1,864
	Recarga = 0,000
Total = 57,673	Total = 57,668

Tabela 8 – Balanço hídrico ao final dos 313 dias de simulação.

Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)
Poços = 37,712	Armazenamento = 46,625
Contorno dependendo da carga = 8,910	Contorno dependendo da carga = 0,00
	Recarga = 0,000
Total = 46,622	Total = 46,625

CONCLUSÕES

Ao analisar as características físico-hídricas da aluvião na área estudada, verificou-se que é constituída basicamente de unidades arenosas, sendo do tipo franco-arenosa e areia franca próximo à superfície e do tipo areia logo abaixo da superfície, não apresentando variabilidade significativa nos três pontos analisados. Observou-se que próximo à superfície da aluvião ocorreu um tempo maior para infiltrar uma lâmina acumulada menor e, à medida que se afasta da superfície verticalmente, onde o solo é do tipo areia, levou um tempo menor para infiltrar uma lâmina acumulada maior.

Com a metodologia Beerkan, obteve-se o valor de K_s que foi em média $1,84 \times 10^{-4}$ m/s. Obtiveram-se também as curvas de retenção e condutividade hidráulica em duas profundidades diferentes. As duas profundidades apresentaram similaridades, com baixa capacidade de retenção e valores de K_s aumentando mais significativamente quando $\vartheta > 0,30$ cm³/cm³.

Em relação ao monitoramento dos níveis de água nos poços, os dados mostram um rebaixamento de 14,4 cm por mês no Poço 3, que está mais a jusante, e de 10 cm por mês para os outros dois poços, o que indica que as reposições foram menores que as retiradas, chegando a dezembro de 2016 com uma lâmina de aproximadamente 20 cm acima do embasamento

cristalino nos três poços. Logo, possivelmente em dois meses não existiria volume disponível nesses poços para bombeamento. No entanto, essa lâmina manteve-se com poucas variações nas observações realizadas nos primeiros meses de 2017, o que indica que pode haver um aporte contínuo de água à jusante que mantém essa lâmina mínima, ou uma disposição do embasamento cristalino que serve de barreira à montante.

Construiu-se um modelo computacional satisfatório com uso do programa computacional Visual MODFLOW, no qual os dados calculados pelo modelo aproximaram-se dos observados em campo, alcançando erros associados da ordem de 0,3 m. Observaram-se as direções de fluxo subterrâneo que se dá no sentido de escoamento do rio, e notou-se o rebaixamento do lençol freático na aluvião ao final do período simulado, como esperado.

Quanto à simulação de cenários, foi realizada uma previsão do comportamento da aluvião no final de 2017 considerando uma situação crítica de estiagem, a qual apresentou diminuição significativa das vazões bombeadas. Considerando o prolongamento da estiagem até 2019, foi observado que a aluvião praticamente não apresentou volume de água disponível.

Tabela 9 – Balanço hídrico para o Cenário 1 (até dezembro de 2017).

Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)
Poços = 29,34	Armazenamento = 29,51
Contorno dependendo da carga = 0,00	Contorno dependendo da carga = 0,00
	Recarga = 0,000
Total = 29,34	Total = 29,51

Tabela 10 – Balanço hídrico para o Cenário 2 (até dezembro de 2019).

Saída (m ³ /dia)	Entrada (m ³ /dia)
Poços = 0,205	Armazenamento = 0,228
Contorno dependendo da carga = 0,00	Contorno dependendo da carga = 0,00
	Recarga = 0,000
Total = 0,205	Total = 0,228

Foi possível compreender o comportamento do fluxo de água na aluvião para as condições de recarga e bombeamento dos anos anteriores. O modelo computacional calibrado constitui uma ferramenta bastante útil

para os gestores fazerem previsões que auxiliem nas tomadas de decisões para diversos cenários de precipitações pluviométricas futuras e de regime de bombeamento de poços.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Associação Águas do Nordeste a organização e coordenação da experiência adquirida pelo Projeto Águas de Areia, financiado pela Petrobras Ambiental. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

o apoio financeiro aos projetos de pesquisa da equipe, processos nº 461366/2014-2 e nº 436875/2018-7. O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior a bolsa de estudo durante seu mestrado acadêmico.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). *A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2002. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2002/AEvolucaoDaGestaoDosRecursosHidricosNoBrasil.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2019.
- AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS (APAC). *Portal*. Disponível em: <<http://www.apac.pe.gov.br>>. Acesso em: fev. 2017.
- BRAGA, R. A. P. *et al. Águas de Areias*. 1. ed. Recife: Ed. Clã, 2016.
- CABRAL, J. J. S. P.; PAIVA, A. L. R.; ARAÚJO FILHO, P. F.; VASCONCELOS, G. L. M. B.; SILVA, D. J.; COUTINHO, A. P. Acumulação de Sedimentos e Água no Leito Seco dos Rios no Semiárido. *In*: BRAGA, R. (org.). *Águas de Areias*. Recife: ANE, 2016. 336 p.
- COSTA, M. R.; CIRILO, J.A. Análise do potencial de uso das águas subterrâneas na semi-árida do estado de Pernambuco. II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. São Paulo, SP. *Anais [...] 2011*. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/28089/18213>. Acesso em: 01 ago. 2019.
- D'ORCIA, M.; ZANINI, A. Characterization of Hydraulic Heterogeneity of Alluvial Aquifer Using Natural Stimuli: A Field Experience of Northern Italy. *Water*, v. 11, n. 1, p. 176, 2019. <http://doi.org/10.3390/w11010176>
- EHTIAT, M.; MOUSAVI, S. J.; SRINIVASAN, R. Groundwater Modeling Under Variable Operating Conditions Using SWAT, MODFLOW and MT3DMS: a Catchment Scale Approach to Water Resources Management. *Water Resource Management*, v. 32, p. 1631-1649, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1895-z>
- FANG, K.; JI, X.; SHEN, C.; LUDWIG, N.; GODFREY, P.; MAHJABIN, T.; DOUGHTY, C. Combining a land surface model with groundwater model calibration to assess the impacts of groundwater pumping in a mountainous desert basin. *Advances in Water Resources*, v. 130, p. 18-28, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.05.008>
- FURTUNATO, O. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; OLIVEIRA, L. M. M.; SOUZA, E. S.; MOURA, A. E. S. Variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos de solos em uma bacia experimental no estado de Pernambuco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 2, p. 135-147, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v18n2.p135-147>
- KHATTABI, J. E.; LOUCHE, B.; DARWISHE, H.; CHAABAN, F.; CARLIER, E. Impact of fertilizer application and agricultural crops on the quality of groundwater in the alluvial aquifer, Northern France. *Water Air Soil Pollution*, v. 229, p. 128, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3767-4>

- KLAAS, D. K. S. Y.; IMTEAZ, M. A.; SUDIAYEM, I.; KLAAS, E. M. E.; KLAAS, E. C. M. Assessing climate changes impacts on tropical karst catchment: Implications on groundwater resource sustainability and management strategies. *Journal of Hydrology*, v. 582, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124426>
- LUKJAN, A.; SWASDI, S.; CHALERMYANONT, T. Importance of alternative conceptual model for sustainable groundwater management of the Hat Yai Basin, Thailand. *Procedia Engineering*, v. 154, p. 308-316, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.480>
- MAO, W.; ZHU, Y.; DAI, H.; YE, M.; YANG, J.; WU, J. A comprehensive quasi-3-D model for regional-scale unsaturated-saturated water flow. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 23, p. 3481-3502, 2019. <https://doi.org/10.5194/hess-23-3481-2019>
- McDONALD, M. G.; HARBAUGH, A. W. *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model*. Technical Report. Denver: U.S. Geological Survey (USGS), 1988. <https://doi.org/10.3133/twri06A1>
- MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ALMEIDA, T. A.; COSTA NETTO, M. L. Uso de águas subterrâneas para a sustentabilidade da pequena agricultura no semi-árido do Nordeste. In: SILUSBA, 7., 2005, Lisboa. *Resumos de Comunicações [...]*. Lisboa, 2005.
- MOOERS, E. W.; JAMIESON, R. C.; HAYWARD, J. L.; DRAGE, J.; LAKE, C. B. Low-impact development effects on aquifer recharge using coupled surface and groundwater models. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 23, n. 9, p. 1-11, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001682)
- OCHOA, C. G.; SIERRA, A. M.; VIVES, L.; ZIMMERMANN, E.; BAILEY, R. Spatio-temporal patterns of the interaction between groundwater and surface water in plains. *Hydrological Processes*, v. 34, n. 6, p. 1371-1392, 2020. <https://doi.org/10.1002/hyp.13615>
- PAIVA, A. L. R.; CABRAL, J. J. S. P.; SILVA, A. V.; CAETANO, T. O.; SILVA, D. J.; BRAGA, R. A.P. Evolução tecnológica de poços escavados em leito seco de rio no semiárido. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS, 21., 2015, Brasília. *Anais [...]*. Brasília, 2015.
- PAIVA, A. L. R.; CAETANO, T. O.; SILVA, D. J.; CABRAL, J. J. S. P.; BRAGA, R. A. P. Ocorrência e características construtivas de poços escavados em aluvião - trecho alto do Rio Capibaribe – PE. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE, 12., 2014, Natal. *Anais [...]*. Natal, 2014.
- ROSSMAN, N. R.; ZLOTNIK, V. A.; ROWE, C. M. Simulating lake and wetland areal coverage under future groundwater recharge projections: The Nebraska Sand Hills system. *Journal of Hydrology*, v. 576, p. 185-196, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.046>
- SANTOS, S. M.; PAIVA, A. L. R.; SILVA, V. F. da. Qualidade da água em barragem subterrânea no semiárido. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, n. 3, p. 651 - 662, 2016 . <https://doi.org/10.7127/rbai.v10n300394>
- SANTOS, C. A. G.; SILVA, J. F. C. B.; SILVA, R. M. Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do riacho Guaraira utilizando o método Beerkan. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n4.p149-160>
- SATHISH, S.; MOHAMED, M.; KLAMMLER, H. Regional groundwater flow model for Abu Dhabi Emirate: scenario based investigation. *Environmental Earth Sciences*, v. 77, 2018. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7544-x>
- SILVA, D. J. *Caracterização da aluvião no alto rio Capibaribe*. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Caruaru, 2015.
- SILVA, G.; FIGUEIREDO, L.; MORAES, M. Curvas de demanda pelos recursos hídricos dos principais usos consuntivos no submédio da bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 36, p. 45-59, 2015. <https://doi.org/10.5327/Z2176-947820151004>

SOUZA, E. S. *Caracterização hidrodinâmica na escala local e da parcela agrícola de dois solos do estado da paraíba: variabilidade espacial e temporal, e meio homogêneo equivalente*. 138f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2005.

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MACIEL NETTO, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do método Beerkan. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008a. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200004>

SOUZA, E. S.; ANTONINO, A. C. D.; ANGULO-JARAMILLO, R.; MACIEL NETTO, A. MONTENEGRO, S. M. G. L.; SILVA, E. B. Variabilidade espacial dos parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, n. 5, p. 1795-1804, 2008b. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000500001>

TEIXEIRA, C.; PORTO, R. Avaliação da qualidade da água e autodepuração dos rios da bacia do rio Piracicaba. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, v. 16, p. 20-31, 2008.

TUNDISI, J. G. *Recursos hídricos no Brasil: problemas, desafios e estratégias para o futuro*. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2014. 76 p.

UNITED STATES. Department of Agriculture (USDA). *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. Washington, D.C.: Soil Conservation Service, 1967. 50 p. (Soil Survey Investigation Report, 1.)

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <http://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

XI-YANG, C.; FENG, R. YAN, L. Research on precipitation simulation of water-rich subway station based on Visual Modflow. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CIVIL AND HYDRAULIC ENGINEERING, 2018. *Anais [...]*. 2018.

ZEINALI, M.; AZARI, A.; HEIDARI, M. M. Simulating unsaturated zone of soil for estimating the recharge rate and flow exchange between a river and an aquifer. *Water Resources Management*, v. 34, p. 425-443, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02458-7>

