

Artigos

Influência da Topografia na Superfície Freática em Dunas Costeiras – Pecém, Ceará

Influence of Topography on the Groundwater Surface in Dunes Coastal – Pecém, Ceará

Francisco das Chagas Soares¹; Juan Moreira de Azevedo¹; Mariano Franca Alencar¹

¹ Instituto Federal do Ceará (IFCE), Fortaleza, CE.

✉ fchsoares@ifce.edu.br, juan.mdeazevedo@gmail.com, francaalencar@yahoo.com.br

Palavras-chave:

Topografia;
Superfície Freática;
Aqüíferos.

Resumo

Comumente, no meio de profissionais e pesquisadores em hidrogeologia, nota-se que em aquíferos livres regionais a superfície freática acompanha moderadamente o relevo. Entretanto, o estudo e aprofundamento desse fenômeno ainda é incipiente e determina um campo aberto a teorias e teses. A compreensão da dinâmica do escoamento em meios porosos em aquíferos sedimentares possui importância estratégica pois estes são mananciais hídricos de potencial apoio ao abastecimento doméstico, comercial e industrial, sobretudo no litoral, possibilitando a determinação de reservas existentes para uso e preservação, bem como a compreensão dos ciclos de renovação destas. Neste sentido, este trabalho aborda o impacto da topografia na formação da superfície freática em Formações Geológicas Dunas de grande ocorrência no litoral brasileiro, tomando como estudo de caso, os campos de dunas na região do Pecém – Ceará. Foi aplicado um índice de influência da topografia, sugerido por Haitjema e Mitchell-Bruker (2005), ao modelo conceitual da área, com os respectivos parâmetros hidrogeológicos, em especial recarga que foi aplicada em sua média histórica anual e, também, em sua média histórica para cada mês do ano. Os resultados apontam para uma variação na influência do relevo na formação da superfície freática sobretudo devido a sazonalidade do regime de chuvas, apresentando que apenas nos meses de maior pluviometria (março e abril) há indicadores da influência da topografia no formato da superfície freática.

Keywords:

Topography;
Water Table;
Aquifers.

Revisão por pares.
Recebido em: 20/12/2021.
Aprovado em: 27/03/2022.

Abstract

Groundwater professionals and scholars have adopted regional aquifers that the water table moderately follows the topography. However, the study and deepening of this phenomenon is still incipient. Understanding the dynamics of the flow in porous media in sedimentary aquifers is strategic; it determines important water sources to support domestic, commercial and industrial supply. In this sense, this work addresses the impact of topography on the formation of the water table in dune regions of great occurrence on the coast of Brazil, taking as study the field of dunes in Pecém - Ceará. The topography influence suggested by Haitjema and Mitchell-Bruker (2005) was applied to conceptual models of the area. The recharge was applied to the annual average and to the average of each month of the year. The results indicates the change in the influence of the topography on the formation of the water table, mainly due to the seasonality of the rainfall regime, showing that only in the months of higher rainfall (March and April) are there indicators of the influence of topography on the shape of the water table.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v36i1.30102>

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os índices topográficos têm adquirido importância estratégica na simulação de processos superficiais hidrológicos, erosivos e de transporte de poluentes. Zonas de grande umidade em uma bacia hidrográfica podem ser previstas espacialmente por meio desses índices (MINELLA; MERTEN, 2012). Nesse contexto, a topografia se firma como importante elemento a ser estudado, já que as características do relevo condicionam os fluxos superficiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes) (MOORE *et al.*, 1991).

Seguindo a interpretação dada por King (1899), a superfície

freática, comumente, tende a acompanhar aproximadamente as formas do relevo – assim, morros apresentam aumento da carga hidráulica enquanto vales a diminuição desta.

Haitjema e Mitchell-Bruker (2005) estabelecem que a influência da topografia na superfície freática depende de múltiplos fatores, tais como condutividade hidráulica, transmissividade, relevo, extensão do aquífero e recarga.

Para revelar essa influência, Haitjema e Mitchell-Bruker (2005), propõem um índice quantitativo e geométrico segundo teorias e simplificações largamente aplicadas ao estudo do fluxo subterrâneo em aquíferos livres.

O índice proposto por Haitjema e Mitchell-Bruker (2005), tem sido utilizado para embasar, dentre outros, estudos sobre as mudanças de fluxo entre as águas subterrâneas e águas superficiais, considerando as mudanças sazonais de recarga (ZHANG, *et al.*, 2022), assim como estudos de descargas de água doce em lagos (TECKLENBURG; BLUME, 2017) e em mares salinos e (ZHOU *et al.*, 2018; ZHOU *et al.*, 2019).

A zona costeira do Ceará, caracterizada por depósitos de dunas, constitui-se em um importante ambiente para aplicação e/ou desenvolvimento de índices ligados à topografia, devido à relativa homogeneidade dos sedimentos, isotropia horizontal da formação e à grande capacidade de recarga direta favorecida pela exposição do solo. A extração de água em aquíferos costeiros desempenha, ainda, importante papel para o abastecimento de comunidades nessas regiões, seja como fonte estratégica para períodos de estiagem ou como principal fonte de água potável.

Em um cenário de escassez prolongada, o índice de Haitjema e Michell-Bruker representa um avanço na direção do convívio sustentável com os períodos de estiagem e no manejo consequente dos recursos hídricos disponíveis – tendo, portanto, certo impacto econômico e social.

A região costeira escolhida, próxima ao porto do Pecém - Ceará, coloca-se como um recorte representativo do litoral da Região Nordeste Brasileira, estabelecendo um bom exemplo das feições existentes em campos de dunas móveis e paleodunas, com características hidrogeológicas conhecidas, limites bem definidos por riachos permanentes e de poços que possuem série histórica do registro do nível estático.

Para a identificação da influência da topografia na superfície freática será usado o modelo numérico de fluxo calibrado da área que será sobreposto à superfície topográfica, variando a recarga na região para identificação do impacto da topografia com a aplicação do índice de Haitjema e Mitchell-Bruker (2005).

Este trabalho, portanto, aplicará o referido índice ao aquífero freático do campo de dunas em Pecém - Ceará para identificar a influência da topografia na forma da superfície freática na região.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

King (1899) observou que a superfície freática tende a acompanhar a superfície topográfica da região. A superfície freática apresenta elevações e vales aproximadamente compatível com as formas da superfície acima desta.

Dupuit (1863) foi o primeiro a resolver problemas de fluxo de água subterrânea regional. Ignorando o fluxo vertical, reduziu a complexidade do problema para fluxo horizontal unidimensio-

nal ou bidimensional. Forchheimer (1886) apresentou uma equação diferencial para a elevação da superfície freática em aquíferos não confinados, usando a aproximação de Dupuit.

Toth (1963) ofereceu uma solução de fluxo regional de água subterrânea incluindo a resistência ao fluxo vertical, mas ele assumiu a priori a posição da superfície freática: uma réplica subjugada da topografia. Como consequência, Toth (1963) introduziu o conceito de células de fluxo regionais, intermediárias e locais, aninhadas, considerando componentes horizontais e verticais do fluxo.

As teorias de Dupuit-Forchheimer e Toth são modelos regionais conceituais, aparentemente conflitantes de fluxo de águas subterrâneas (um despreza e o outro considera a resistência vertical ao escoamento). Entretanto, ambos modelos de fluxo regional podem ser esperados na natureza, pois se aplicam a diferentes condições hidrogeológicas.

Modernamente, o fluxo vertical da aproximação de Dupuit-Forchheimer é comumente adotado, ou seja, a resistência ao fluxo vertical é ignorada (STRACK, 1989), prejudicando a formação de células de fluxo aninhadas previstas por Toth.

Mitchell-Bruker, em 1993, comparara perfis bidimensionais em estado estacionário obtidos pelas duas abordagens. Nestes modelos, as funções de linha de drenos lineares – *line sink* (STRACK, 1989) são usadas para criar limites de recarga ou de carga especificada para o regime de fluxo.

Como resultado desses perfis bidimensionais, ao se medir a altura da superfície freática em vários locais da bacia hidrográfica, parece que esta se apresenta como uma réplica moderada do relevo, pelo menos em um sentido geral. No entanto, se um modelo for desenvolvido onde a superfície freática é, em todos os lugares, igual ao relevo, sistemas de fluxo com inúmeras células de fluxo locais são formados apresentando zonas de significativo fluxo vertical. Se as mesmas condições de contorno superior especificadas pela carga (superfície freática igual ao relevo) são aplicadas a um aquífero mais profundo, um sistema de fluxo local, intermediário e regional é obtido – semelhante às células obtidas pelo modelo proposto por Toth (1963).

Aquíferos regionais rasos, no entanto, foram modelados com sucesso pelo uso da aproximação de Dupuit-Forchheimer, que ignora resistência vertical ao fluxo.

Assumindo as hipóteses de Dupuit-Forchheimer e adotando o conceito de potencial de descarga (STRACK, 1989), podemos chegar a um equacionamento que nos conduz a formulação que traduz o comportamento descrito por Mitchell-Bruker (1993). Para o caso unidimensional, o potencial de descarga é definido como:

$$\Phi = \frac{K\phi^2}{2} + c$$

Para aquíferos livres, teremos,

$$\frac{d^2\Phi}{dx^2} = -\mathcal{N}$$

Φ - Potencial de Descarga [L^3T^{-1}]

$$(01) \quad K - \text{Conductividade hidráulica } [LT^{-1}]$$

ϕ - Carga Hidráulica [L]

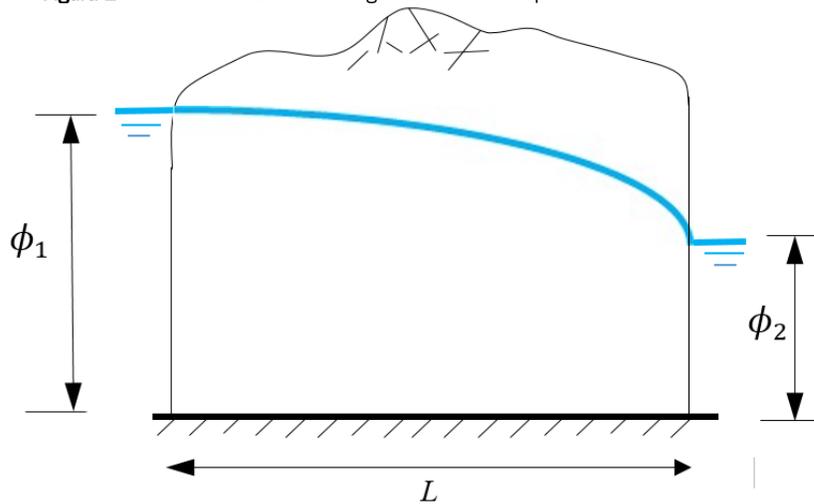
\mathcal{N} - Recarga [LT^{-1}]

c - Constante de integração [L^3T^{-1}]

$$(02)$$

O caso de escoamento com recarga entre dois córregos paralelos com cargas constantes é esboçado no perfil da Figura 1.

Figura 1 - Modelo analítico de recarga baseado em Dupuit-Forchheimer



Fonte: Adaptado de Bear (1979).

Para as condições de contorno $\phi(0) = \phi_1$ e $\phi(L) = \phi_2$ obtêm-se, a partir da integração de (2) e considerando posteriormente (1), a equação referente ao escoamento, com recarga, entre duas cargas paralelas e constantes:

$$\phi^2 = \frac{-\mathcal{N}}{K}x^2 + \left(\frac{\mathcal{N}L}{K} + \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L}\right)x + \phi_1^2 \quad (03)$$

Desenvolvendo,

$$\phi^2 - \phi_1^2 = \frac{-\mathcal{N}}{K}x^2 + \left(\frac{\mathcal{N}L}{K} + \frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L}\right)x \quad (04)$$

Para L muito maior que a variação da carga hidráulica nos extremos do modelo, tem-se:

$$\frac{\phi_2^2 - \phi_1^2}{L} \rightarrow 0 \quad (05)$$

E seja uma espessura saturada média igual a:

$$\frac{(\phi - \phi_1)}{2} = \bar{H} \quad (06)$$

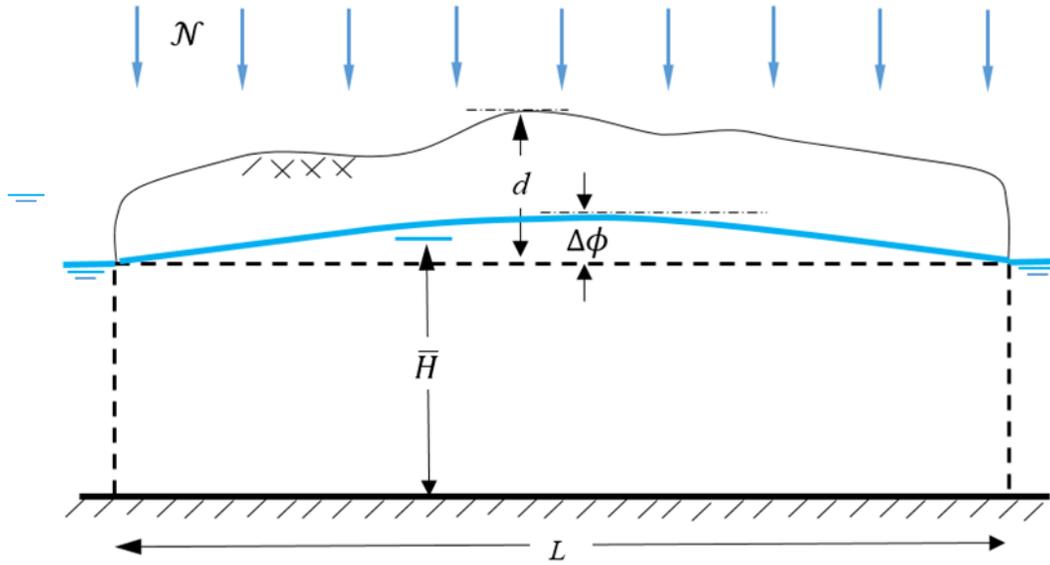
Então,

$$\phi^2 - \phi_1^2 = (\phi - \phi_1)(\phi + \phi_1) = 2\Delta\phi\bar{H} \quad (07)$$

$$2\Delta\phi\bar{H} = \frac{-\mathcal{N}}{K}x^2 + \frac{\mathcal{N}L}{K}x \quad (08)$$

Considerando o modelo conceitual da Figura 2, com predominância da recarga, teremos que o ponto de maior diferença de carga hidráulica, $\Delta\phi$, será em $L/2$.

Figura 2 – Acúmulo de água subterrânea devido à recarga



Fonte: Haitjema e Mitchell-Bruker (2005).

A Figura 2 também pode ser interpretada como fluxo em uma ilha circular com diâmetro L [m], caso em que o acumulado no centro da ilha torna-se:

$$\Delta\phi = \frac{\mathcal{N}}{16K\bar{H}} L^2 \quad (08)$$

Podemos generalizar a equação acima, considerando um fator m para a geometria do escoamento, dividindo-se ambos os lados pela maior distância d entre a elevação da superfície freática e a superfície do terreno e explicitando algumas relações notáveis temos:

$$\frac{\Delta\phi}{d} = \frac{1}{m} \frac{\mathcal{N}}{K} \frac{L}{\bar{H}} \frac{L}{d} \quad (09)$$

Onde m é 8 ou 16, dependendo de o problema de fluxo ser unidimensional ou simétrico radial, respectivamente. A equação acima ilustra que a elevação da superfície freática é sensível à distância L entre os contornos hidrológicos (águas superficiais).

Dada a geometria de um aquífero em particular e assumindo uma espessura média H saturada, no entanto, a elevação da superfície freática dependerá apenas da relação entre recarga e condutividade hidráulica, \mathcal{N}/K que é adimensional. Sob

condições de fluxo não confinado, a espessura saturada média H aumentará com o aumento da superfície freática e a resposta a \mathcal{N}/K torna-se não linear.

O resultado para o acumulado no centro do aquífero $\Delta\phi$ é obtido ignorando-se a resistência ao fluxo vertical, que constitui a aproximação de Dupuit-Forchheimer. A validade desta aproximação depende da geometria do aquífero e, em menor medida, do grau de anisotropia vertical.

Como regra prática, a aproximação de Dupuit-Forchheimer é aceitável quando a distância entre os limites hidrológicos é grande (BEAR, 1972; HARR, 1962) em comparação com a espessura média do aquífero:

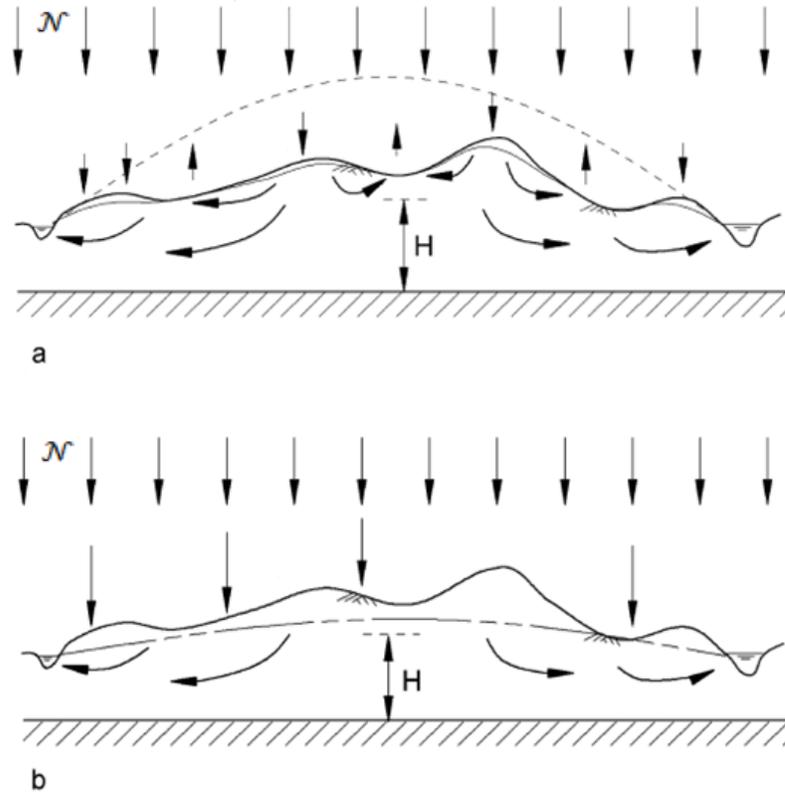
$$L \gg \sqrt{\frac{k_H}{k_V}} H; \quad L > 5H \quad (10)$$

k_H – Condutividade hidráulica horizontal [LT⁻¹]

k_V – Condutividade hidráulica vertical [LT⁻¹]

Na Figura 3, uma seção transversal sobre um aquífero regional é esboçada com uma superfície freática em resposta à recarga direta para dois casos notáveis.

Figura 3 – (a) Aquífero de baixa condutividade hidráulica com a superfície freática controlada pela topografia; (b) aquífero de alta condutividade hidráulica com a superfície freática não controlado pela topografia



Fonte: Adaptado de Haitjema (1995).

Uma alta taxa de recarga em combinação com uma baixa condutividade hidráulica do aquífero levaria à superfície freática ser interrompida se o aquífero se elevar muito Figura 3a, enquanto na Figura 3b, uma taxa de recarga relativamente baixa e de alta condutividade hidráulica, resultam em uma superfície freática que não toca a superfície do terreno (independe do terreno). Destaca-se, portanto, que a análise deve ser feita não com os valores absolutos da recarga e da condutividade, mas com a relação adimensional de \mathcal{N}/K .

A magnitude da influência da topografia na superfície freática depende, conforme as equações (08) e (09), da recarga direta na região, da transmissividade do aquífero, dos limites hidrológicos e da própria topografia. Pode-se colocar essa influência como conjunção de três taxas adimensionais para caracterizar o regime de fluxo de água subterrânea:

- I. Recarga pela condutividade hidráulica, \mathcal{N}/K ;
- II. Distância entre os limites hidrológicos sobre a espessura do aquífero saturado, L/H ; e
- III. Distância entre limites hidrológicos sobre a elevação máxima do terreno, L/d .

A elevação máxima do terreno d é definida aqui como a maior distância entre a elevação da superfície freática e a superfície do terreno, geralmente medida na elevação mais alta do terreno (Figura 2).

O termo $\frac{\Delta\phi}{d}$ é a razão entre o acúmulo máximo e a elevação máxima do terreno, ambos medidos em relação às cotas das águas superficiais dos limites hidrológicos circundantes (HAITJEMA; MITCHELL-BRUKER, 2005) e representa o índice topográfico para aquíferos livres ou índice de Haitjema e Mitchell-Bruker adotado nesse estudo.

A constante m depende do tipo de fluxo. Para fluxo unidimensional entre dois limites de água superficiais paralelos $m=8$, enquanto para fluxo radial em um aquífero de diâmetro L , $m=16$. Na prática, portanto, espera-se que m esteja em algum lugar entre esses valores, $8 \leq m \leq 16$ (HAITJEMA; MITCHELL-BRUKER, 2005).

Se a proporção $\frac{\Delta\phi}{d}$ (índice de Haitjema e Mitchell-Bruker) for maior que 1,00 (um), a superfície freática provavelmente interceptará a superfície do terreno em um ou mais locais. Para valores de $\frac{\Delta\phi}{d} > 1$, a situação representada que a topografia

controla essencialmente a localização da superfície freática, Figura 3a.

Por outro lado, quando $\frac{\Delta\phi}{d} < 1$, Figura 3b, ocorre onde a superfície freática é controlada por outros parâmetros do aquífero essencialmente não relacionado à topografia.

Deve-se ressaltar que, mesmo que a superfície freática seja controlada por topografia, isso não significa, automaticamente, que a superfície freática deva estar localmente paralela à superfície do terreno (HAITJEMA; MITCHELL-BRUKER, 2005). O surgimento de células envolvendo fluxo vertical significativo na direção dos pontos mais baixos do terreno, consistente com a análise original de Toth, pode restringir a elevação de água subterrânea, deformando a superfície freática.

Recarga e a condutividade, entretanto, não são os únicos parâmetros que determinam a diferença entre superfícies freáticas controladas por topografia ou não. A espessura do aquífero e a distância entre a disposição das águas superficiais

ais também desempenham papel relevante – como pode ser visto nas equações (09) e (10);

3. ÁREA DE ESTUDO

Conforme Azevedo (2020), a área de estudo situa-se no Município de São Gonçalo do Amarante - Ceará, próximo ao Centro Industrial e Portuário do Pecém (CIPP), limitando-se ao Norte com o Oceano Atlântico, a Oeste com o riacho Siupé ou Anil (Município de Paracuru), a Leste com o Lagamar do Cauípe (Município de Caucaia) e a Sul limita-se com rochas do embasamento cristalino geralmente afloradas, Figura 4.

A base impermeável do aquífero sedimentar (Dunas/Paleodunas) fica sobre o Cristalino a uma cota média em relação ao nível do mar de -17m.

As médias pluviométricas históricas podem ser caracterizadas pelos postos pluviométricos da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) descritas na Tabela 1.



Fonte: Adaptado de Azevedo (2020).

Tabela 1 – Médias histórica pluviometria (FUNCEME, 1977-2018)

Mês	Paracuru (mm)	São Gonçalo (mm)	Caucaia (mm)	Média (mm)
Janeiro	112,8	93,8	128,9	111,83
Fevereiro	149,4	149,1	187,5	162,00
Março	280,5	226,7	315,9	274,37
Abril	305,7	237,7	298,7	280,70
Mai	197,5	116,4	161,4	158,43
Junho	118,9	74,8	112,6	102,10
Julho	61,3	39,5	53,4	51,40
Agosto	6,8	4,3	12,4	7,83
Setembro	5,3	3,7	8,9	5,97
Outubro	1,1	2,2	3,4	2,23
Novembro	1,2	1,5	2,6	1,77
Dezembro	18,3	18,1	25,7	20,70
Total anual	1258,8	967,8	1311,4	1179,3

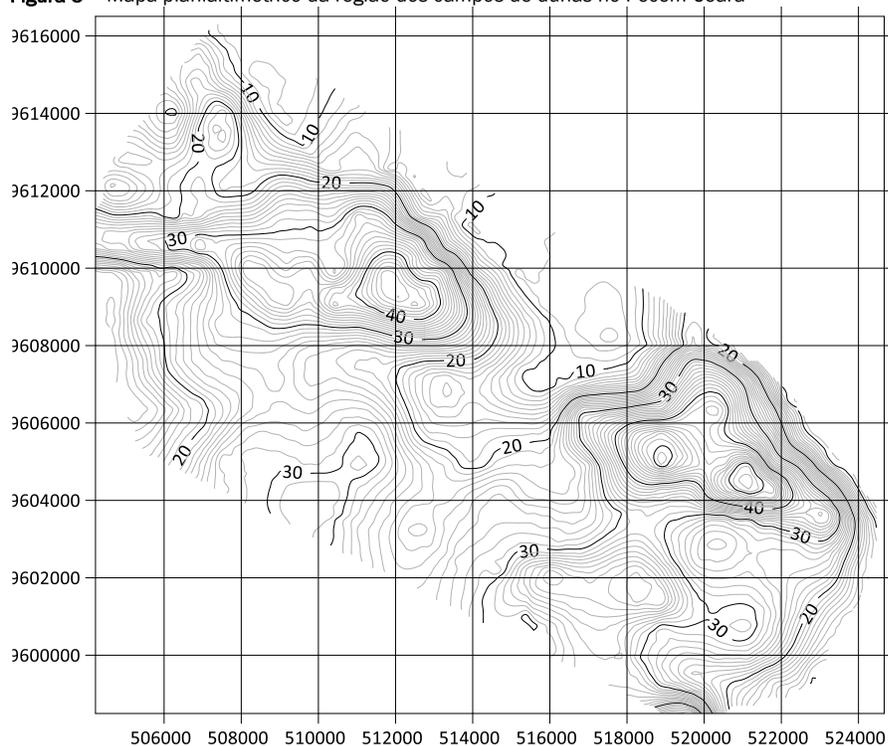
Observa-se a grande variação da pluviometria ao longo do ciclo hidrológico na região. O período chuvoso ocorre nos meses de fevereiro, março, abril e maio (quadra chuvosa) com média de 218,88 mm/mês, enquanto para os demais meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro a média é de apenas 38,00 mm/mês.

Observa-se a grande variação da pluviometria ao longo do ciclo hidrológico na região. O período chuvoso ocorre nos meses de fevereiro, março, abril e maio (quadra chuvosa) com média de 218,88 mm/mês, enquanto para os demais meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro a média é de apenas 38,00 mm/mês.

Observa-se a grande variação da pluviometria ao longo do ciclo hidrológico na região. O período chuvoso ocorre nos meses de fevereiro, março, abril e maio (quadra chuvosa) com média de 218,88 mm/mês, enquanto para os demais meses de junho, julho, agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro e janeiro a média é de apenas 38,00 mm/mês.

Conforme Azevedo (2020), a área de estudo apresenta a con-

Figura 5 – Mapa planialtimétrico da região dos campos de dunas no Pecém-Ceará



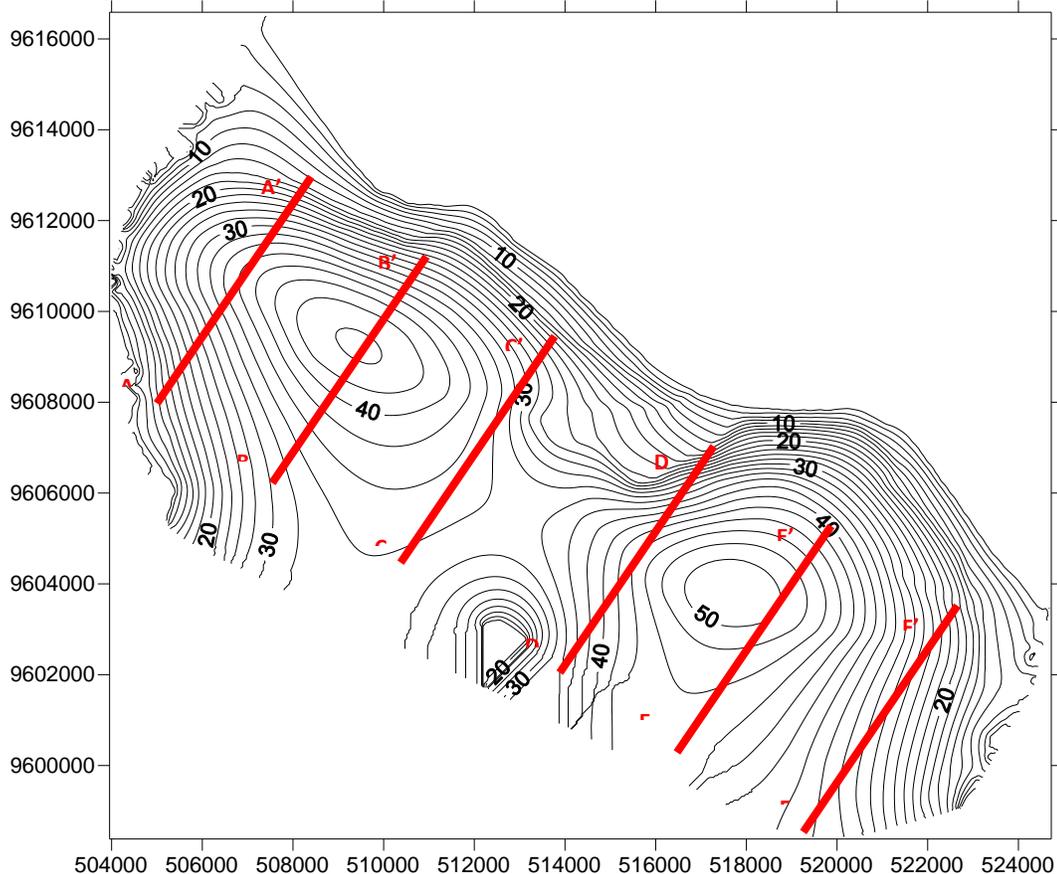
Fonte: Azevedo (2020).

4. METODOLOGIA

A metodologia adotada consiste em primeiramente delimitar a área foco a ser estudada cujos principais critérios de seleção foram a homogeneidade dos sedimentos e exposição do solo – recaindo nas zonas com predominância das formações Dunas e Paleodunas. Assim, espera-se minimizar interferências por

mudanças de material sedimentar e impermeabilizações que dificultem a recarga direta. Foram selecionados dois campos de dunas presentes em uma faixa de aproximadamente 5,5 km ao longo da linha da costa (Figura 4). Os perfis foram localizados nos campos de dunas, conforme o modelo numérico calibrado da superfície freática para a recarga anual, Azevedo (2020), Figura 6.

Figura 6 – Modelo para da superfície freática com perfis localdos nos campos de dunas



Fonte: adaptado de Azevedo (2020).

Para cada campo de dunas foram feitos três perfis (cortes transversais) perpendiculares à linha de costa. Observa-se que o índice proposto por Haitjema e Mitchell-Bruker foi definido a partir de planos verticais – daí a necessidade de estabelecer cortes verticais representativos da área estudada, Figura 6.

Adotou-se o valor de recarga anual média para região de $1,34E-08$ m/s, bem como o valor da condutividade horizontal da formação Dunas como predominante: $1,25E-04$ m/s. Neste trabalho, será adotada uma condutividade hidráulica horizontal 10 vezes maior que a condutividade hidráulica vertical.

A espessura do aquífero foi estimada a partir da topografia (altitude) e o plano -17m, conforme a profundidade média do cristalino. A superfície freática adotada foi a obtida por Azevedo

(2020).

Dois campos de dunas foram identificados a partir da topografia, um a noroeste da área selecionada e outro a sudeste (Figura 4).

Para cada perfil, verificou-se a validade para as simplificações de Dupuit-Forchheimer e calculou-se o índice $\Delta h/d$.

Como o índice $\Delta h/d$ varia devido ao fator m de geometria da região e considerando este fator entre 8 e 16, considerou-se o valor médio obtido como referência.

A partir dos valores obtidos para $\Delta h/d$, conforme descrito no parágrafo anterior, convencionou-se, para este trabalho, que

para valores obtidos entre zero e 0,75 caracterizaria que o relevo não influencia na forma da superfície freática; para valores entre 0,75 e 1,25 há indefinição podendo ser caracterizar uma transição entre a não influência e a influência da topografia; já para valores acima de 1,25 adotou-se que o perfil sofre influência da topografia.

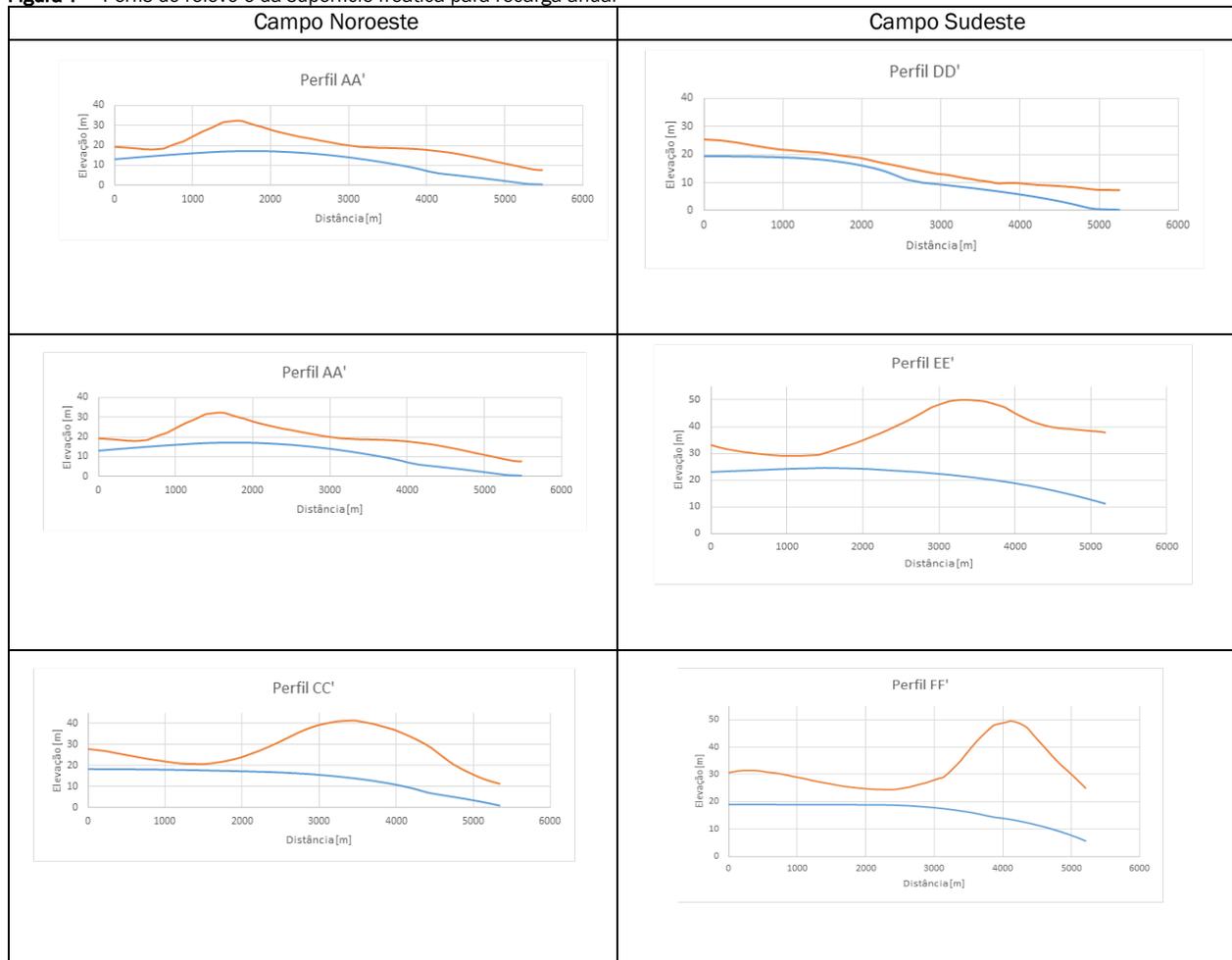
Para a simulação da recarga média anual, adotou-se 36%, conforme o estudo de Azevedo, 2020. Para este trabalho, foram simuladas, ainda, recargas médias para cada mês do ciclo anual de chuvas, adotando-se a mesma taxa de 36%. Todas as superfícies freáticas encontradas nas simulações foram obtidas em estado permanente de escoamento. De posse da superfície topográfica, da condutividade hidráulica da região, das distâncias dos perfis traçados e das diferentes recargas e respectivas superfícies freáticas, foi possível

estabelecer o índice de Haitjema e Mitchell-Bruker para cada simulação em seu valor máximo e mínimo (conforme o valor geométrico $8 \leq m \leq 16$). Para efeito de análise, adotou-se o valor médio obtido para cada uma das simulações envolvidas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices obtidos a partir da simulação com recarga anual apresentaram em todos os perfis valores significativamente abaixo de 1,00 (um), indicando a não influência da topografia ao considerar ciclo anual de chuvas, como pode ser visto Figura 7 e Tabela 2, $\Delta h/d$ (valor médio). Observa-se que para a validade das hipóteses de Dupuit-Forchheimer todos os valores de teste obtidos foram bem abaixo do limite estabelecido, indicando sua validade - Validade das Hipóteses de Dupuit-Forchheimer [m].

Figura 7 – Perfis do relevo e da superfície freática para recarga anual



Para as simulações com recargas mensais, observa-se uma significativa variação dos índices obtidos. A maioria dos perfis analisados mensalmente, exceto os perfis C e F que apresentaram valores limítrofes, apontam para uma diferença de status nos meses da quadra chuvosa (fevereiro a maio). Em mar-

ço e abril, a influência da topografia parece consolidada e nos meses de fevereiro e maio há certa indefinição indicando uma transição entre a influência e não influência da topografia. Os demais meses a não influência fica patente – Tabela 3.

Tabela 2 – Resumo dos parâmetros calculados para os índices de influência da topografia para calibração anual

Parâmetros	Campo Dunas Noroeste			Campo Dunas Sudeste		
	Perfil A	Perfil B	Perfil C	Perfil D	Perfil E	Perfil F
N[m/s]	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08	1,34E-08
K[m/s]	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04
L[m]	5478,01	5393,59	5340,53	5256,37	5184,92	5206,71
Carga inicial [m]	13,13	18,55	18,32	19,35	23,04	19,01
Carga Final [m]	0,45	1,25	1,04	0,27	11,19	5,73
Base[m]	-17,00	-17,00	-17,00	-17,00	-17,00	-17,00
Khoriz [m/s]	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04	1,25E-04
Kvert [m/s]	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05	1,25E-05
H[m]	25,38	27,11	25,64	26,54	23,67	23,64
Validade das Hipóteses Dupuit-Forchheimer [m] << 5500	80,27	85,72	81,08	83,94	74,86	74,75
N/K	1,07E-04	1,07E-04	1,07E-04	1,07E-04	1,07E-04	1,07E-04
L/H	215,80	198,97	208,30	198,02	219,03	220,25
L/d	221,31	311,99	177,59	290,31	247,29	207,33
$\Delta h/d (m=8)$	0,64	0,83	0,49	0,77	0,72	0,61
$\Delta h/d (m=16)$	0,32	0,42	0,25	0,38	0,36	0,31
Valor Médio	0,48	0,62	0,37	0,58	0,54	0,46

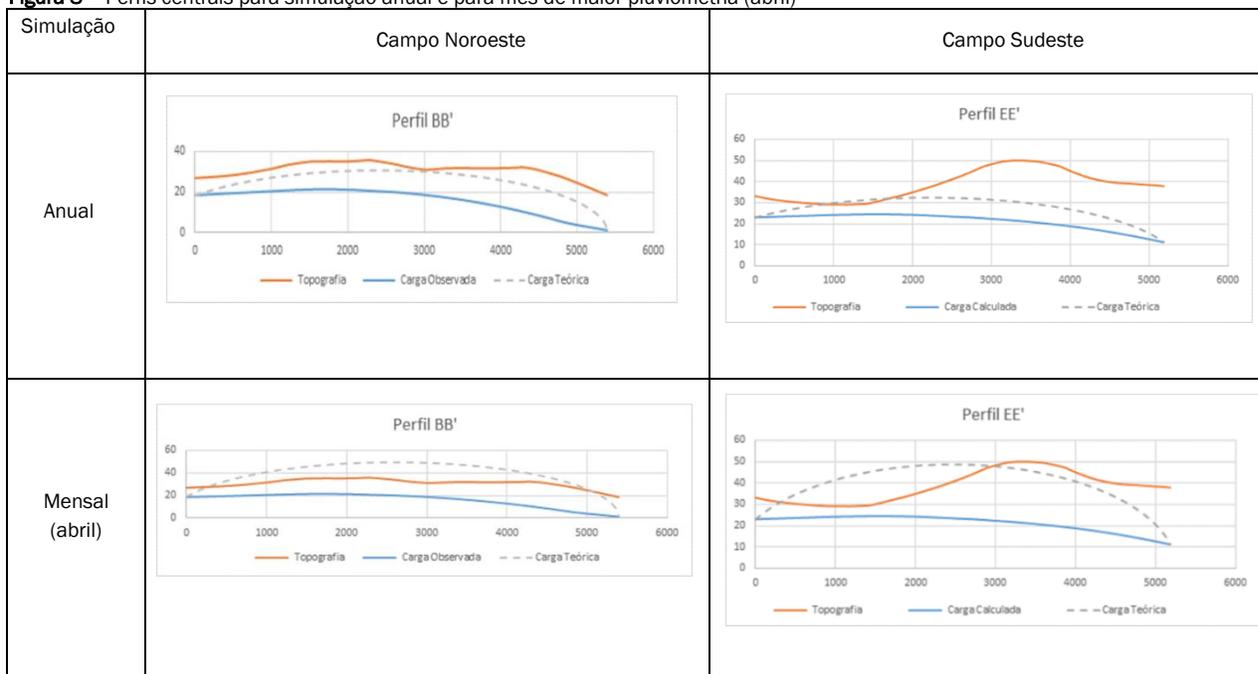
Tabela 3 – Resumo dos índices de influência da topografia e transição para correção mensal proporcional a pluviometria média

Mês	Perfil A		Perfil B		Perfil C		Perfil D		Perfil E		Perfil F	
	Valor Central	Infl. Top.										
Janeiro	0,55	Não	0,71	Não	0,42	Não	0,66	Não	0,62	Não	0,52	Não
Fevereiro	0,80	Trans.	1,04	Trans.	0,62	Não	0,96	Trans.	0,90	Trans.	0,76	Trans.
Março	1,34	Sim	1,74	Sim	1,04	Trans.	1,61	Sim	1,52	Sim	1,28	Sim
Abril	1,37	Sim	1,78	Sim	1,06	Trans.	1,65	Sim	1,56	Sim	1,31	Sim
Maio	0,77	Trans.	1,00	Trans.	0,59	Não	0,92	Trans.	0,87	Trans.	0,73	Não
Junho	0,49	Não	0,64	Não	0,38	Não	0,59	Não	0,56	Não	0,47	Não
Julho	0,33	Não	0,32	Não	0,19	Não	0,30	Não	0,28	Não	0,24	Não
Agosto	0,04	Não	0,05	Não	0,03	Não	0,04	Não	0,04	Não	0,04	Não
Setembro	0,03	Não	0,04	Não	0,02	Não	0,03	Não	0,03	Não	0,03	Não
Outubro	0,01	Não										
Novembro	0,01	Não										
Dezembro	0,10	Não	0,13	Não	0,08	Não	0,12	Não	0,11	Não	0,10	Não
Anual	0,48	Não	0,62	Não	0,37	Não	0,58	Não	0,54	Não	0,46	Não

Interessante notar que a região é abundante de riachos e córregos temporários, bem como de lagoas interdunares intermitentes, que devem surgir no período chuvoso do ano, permanecer durante algum tempo e desaparecer no período de estiagem, entretanto, dependendo do regime de chuvas de anos sucessivos é possível que alguns desses córregos prolonguem sua existência alimentados pelo aquífero costeiro. O trabalho de Portela, Freire e Morais (2017), corroboram essa afirmação, na medida que mostra os espelhos d'água intermitentes na região do campo de dunas Noroeste.

A influência da recarga na mudança de status pode ser vista nos gráficos da Figura 8. Os gráficos da primeira linha da Figura 8 apresentam o relevo e a carga observada para médias anuais e em pontilhado a carga teórica relativa à recarga estimada anualmente, apesar de abaixo da topografia a carga teórica se coloca acima da carga observada devido aos fluxos fora do plano do corte BB' e EE', ou seja, devido a geometria do escoamento, entretanto fica visível a não influência da topografia.

Figura 8 – Perfis centrais para simulação anual e para mês de maior pluviometria (abril)



Na segunda linha da Figura 8, a recarga está calculada, conforme a média mensal para o mês de abril (mês de maior pluviometria média), indicando forte tendência a elevar a superfície freática – influência direta da topografia segunda a teoria ilustrada na Figura 5.

6. CONCLUSÃO

Em aquíferos livres, o fluxo subterrâneo é determinado pela altura da superfície freática (carga hidráulica). Comumente, associa-se as configurações do relevo topográfico à superfície freática. Entretanto, esse fenômeno é pouco estudado o que nos leva a indefinição quanto às circunstâncias hidrogeológicas em que ocorre.

A aplicação de um índice baseado na teoria de Dupuit-Forchheimer indica eficazmente as condições para a superfície freática acompanhar a topografia de uma dada região.

O índice sugerido, sobretudo influenciado pela relação Recarga por Condutividade Hidráulica, apontou para a pouca influência

da topografia no aquífero costeiro de dunas quando consideramos uma simulação com médias anuais de recarga. Entretanto, ao estender a análise usando uma recarga proporcional à pluviometria para cada mês (médias históricas), observou-se que o status do aquífero muda ao longo do ano e que há forte tendência da superfície freática ser influenciada pela topografia das dunas nos meses de maior precipitação (março e abril), para os meses de fevereiro e maio a influência da topografia é limítrofe – em aparente transição de/para a não influência predominante no restante do ano.

Importante ressaltar que o surgimento de córregos e lagoas interdunares intermitentes é intensificado nos meses de maior influência do relevo das dunas no formato da superfície freática, estabelecendo zonas úmidas geralmente temporárias nas regiões mais baixas do relevo.

O estudo da geometria das linhas de fluxo na construção dos índices de influência da topografia em perfis, ao longo da superfície freática, tende a ser promissor para obtenção de índices mais precisos, visto que as linhas de fluxo impactam a

descarga nos pontos mais baixos do relevo e interferem no fluxo fora do plano do perfil estudado.

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, J. M., *Caracterização hidrológica e modelagem numérica de fluxo do aquífero dunas entre as praias de pecém e taíba*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) - IFCE, Fortaleza, 2020.

BEAR, J. *Dynamics of fluids in porous media*. New York: American Elsevier, 764p, 1972.

BEAR, J. *Hydraulics of groundwater*. Dover, New York, 569p, 1979.

DUPOIT, J. *Études The oriques et Practiques sur le Mouvement des Eaux dans les Canaux Decouverts et à Travers les Terrains Perméables*, 2nd ed. Paris, France: Dunod, 1863.

FORCHHEIMER, P. Uber die ergiebigkeit von brunnen-anlagen und sickerschlitzen. *Zeitschrift des Architectenund Ingenieurs Vereins zu Hannover* 32, p. 539–564, 1886.

HAITJEMA, H.M. *Analytic element modeling of groundwater flow*. San Diego, California: Academic Press. 1995. <https://doi.org/10.1016/B978-012316550-3/50005-2>

HAITJEMA, H.M., MITCHELL-BRUKER, S. Are water tables a subdued replica of the topography? *Ground Water*, v. 43, n. 6, p. 781–786, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x>

HARR, M.E. *Groundwater and seepage*. New York: McGraw-Hill. 1962.

KING, F. H. *Principles and conditions of movements of ground water*. USGS 19th Annual Report, Part 2, 1899.

MINELLA, J.P.G., MERTEN, G.H., Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.9, p.1575-1582, set. 2012. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782012000900010>

MITCHELL-BRUKER, S. *Modeling steady state groundwater flow and surface water interactions*. Ph.D. diss., School of Public and Environmental Affairs, Indiana University, 1993.

MOORE, I.D. et al. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrological Processes*, v.5, p.3-30, 1991. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>

PORTELA, J. P.; FREIRE, G. S. S.; MORAIS, M. V. A. R. Análise do uso e ocupação do litoral de São Gonçalo do Amarante – Ceará – Brasil, *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 3, n. 2, 2017. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2017v3n2ID12928>

STRACK, O.D.L. *Ground water mechanics*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989.

TECKLENBURG, C., BLUME, T. Identifying, characterizing and predicting spatial patterns of lacustrine groundwater discharge, *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 21, n. 10, p. 5043-5063, 2017. <https://doi.org/10.5194/hess-21-5043-2017>

TOTH, J. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, v. 68, n. 16, p.4795–4812, 1963. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>

ZHANG X. et. al. Fractal behaviors of hydraulic head and surface runoff of the nested groundwater flow systems in response to rainfall fluctuations. *Geophysical Research Letters*, v. 49, n. 2, 2022. <https://doi.org/10.1029/2021GL093784>

ZHOU, Y., et. al., Opportunities and Challenges in Computing Fresh Groundwater Discharge to Continental Coastlines: A Multimodel Comparison for the United States Gulf and Atlantic Coasts, *Water Resources Research*, v. 54, 10, p.8363-8380, 2018. <https://doi.org/10.1029/2018WR023126>

ZHOU, Y., et. al., Fresh Submarine Groundwater Discharge to the Near-Global Coast. *Geophysical Research Letters*, v. 46, 11, p.5855-5863, 2019. <https://doi.org/10.1029/2019GL082749>