



ESTIMATIVA DE PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DO AQUIFERO  
EMBORÊ EM FAROL DE SÃO TOMÉ - RJ COM AS OSCILAÇÕES DO  
NÍVEL PIEZOMÉTRICO E MARÉ OCEÂNICA

*EMBORÊ AQUIFER HYDRODYNAMIC PARAMETER ESTIMATION IN FA-  
ROL DE SÃO TOMÉ, RIO DE JANEIRO STATE, BRAZIL, USING OCEAN TI-  
DAL AND PIEZOMETRIC OSCILLATIONS*

Mônica Filipa Sousa Fernandes<sup>1</sup>; João Wagner Alencar Castro<sup>1</sup>;  
Gerson Cardoso Silva Jr.<sup>1</sup>; Gustavo Silva Mendes<sup>1</sup>

Artigo recebido em: 04/03/2016 e aceito para publicação em: 17/06/2016.

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/ras.v30i2.28601>

**Resumo:** A obtenção e interpretação dos parâmetros físicos e químicos dos aquíferos é uma necessidade e um passo importante para o seu entendimento, pois o conhecimento sobre tais parâmetros é ainda, na maioria dos casos, incipiente. O aquífero Emborê, localizado na região Norte Fluminense, é um importante reservatório hídrico no estado do Rio de Janeiro e a população local utiliza-o para seu abastecimento. Deste modo, o conhecimento deste aquífero é de grande importância no contexto regional. O presente trabalho teve como base a instalação de um sensor multiparamétrico no poço UFRJ 05, que operou ao longo de oito meses, obtendo-se dados de temperatura, condutividade elétrica e variação da coluna de água (carga hidráulica). O poço capta o aquífero Emborê, de caráter confinado. Desta forma, o resultado das medidas de temperatura e condutividade do sensor multiparamétrico não sofreram oscilações significativas de salinidade e temperatura ao longo do período. Quanto à variação na carga hidráulica no poço, verificou-se que esta estava diretamente ligada à variação das marés oceânicas, oscilando conforme os ciclos de maré. Assim, aplicou-se metodologia de estimativa de cálculo que permitiu obter a difusividade hidráulica do aquífero em relação à maré e a comparação deste dado com os de um teste de bombeamento feito no próprio poço, avaliando-se as vantagens e desvantagens de obtenção de parâmetros do aquífero por cada método.

**Palavras-chave:** Sensor multiparamétrico. Aquífero costeiro Emborê. Farol de São Tomé.

**Abstract:** Obtaining and interpreting physical and chemical parameters of groundwater bodies is vital and an important step for aquifer conceptualization, but knowledge of these parameters is still, in most cases, incipient. The Emborê aquifer, located in the northern Fluminense region, is an important reservoir in the state of Rio de Janeiro, Brazil, and the local population relies on it for domestic water supply. Knowledge of the aquifer is of great importance in the regional context. This work was based on the installation of a multi-parameter sensor in monitoring well 'UFRJ 05', which operated over eight months to gather temperature, electric conductivity head data. The well drains the Emborê Aquifer, a water body with a confined nature. Results of temperature and conductivity measurements from the multiparameter probe did not show significant variations in salinity and temperature throughout the period. Regarding hydraulic head variation, it was directly linked to the variation in ocean tide cycles. Therefore, a methodology was applied to estimate aquifer hydraulic diffusivity relative to the tide. The comparison of resulting data with the hydraulic diffusivity from a pumping test carried out in UFRJ 05 well, allowed evaluation of advantages and disadvantages of acquiring aquifer parameters by each method.

**Keywords:** Multiparameter sensor. Emborê coastal aquifer. Farol de São Tomé.

## 1 INTRODUÇÃO

A estimativa de parâmetros dos aquífe-  
ros é de vital importância para o entendimento

dos processos hidrodinâmicos e hidroquími-  
cos atuantes no sistema hídrico subterrâneo,  
bem como na avaliação dos recursos hídricos.  
A correta definição do modelo conceitual de

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) ([monicafernandes\\_18@hotmail.com](mailto:monicafernandes_18@hotmail.com), [castro@mn.ufrj.br](mailto:castro@mn.ufrj.br), [gerson@acd.ufrj.br](mailto:gerson@acd.ufrj.br), [mendegustavo@gmail.com](mailto:mendegustavo@gmail.com))

funcionamento dos sistemas aquíferos é fortemente dependente da obtenção desses parâmetros, tanto físicos como de transporte.

No presente artigo obtiveram-se, através de técnicas de campo, parâmetros físicos do Aquífero Emborê, de natureza confinada, situado na região do Farol de São Tomé, no município de Campos dos Goytacazes. Para os aquíferos situados próximos à linha de costa, a aplicação de testes de bombeamento pode ser complementada, ou mesmo em alguns casos substituída, pela estimativa de parâmetros do aquífero através da variação da coluna de água no poço que sofre o efeito da maré oceânica. Assim, o método consiste em avaliar as oscilações de maré oceânica e terrestre e seus efeitos sobre a carga hidráulica do aquífero medida no poço.

O estudo das flutuações do nível piezométrico induzidas pelas marés oceânicas constitui, segundo Almeida e Silva (1983), um excelente campo de estudo para aquíferos costeiros, podendo ser usado para estimar parâmetros hidrodinâmicos desses aquíferos (LI e JIAO, 2001; LI e JIAO, 2003; LI e LI 2007a; FADILI *et al.*, 2012). A determinação de parâmetros hidrogeológicos baseada nas oscilações de nível piezométrico induzidas pelas marés foi proposta inicialmente por Jacob (1950) e Ferris (1951), e desde então o tema tem sido objeto de estudo de diversos autores (LI e JIAO, 2001; CAPACCIONI *et al.*, 2005; FADILI *et al.*, 2012; FADILI, 2014). Resumidamente, aplica-se a equação da difusividade hidráulica para determinar características hidrodinâmicas do aquífero. A análise da flutuação contínua do nível do mar produz uma sequência de ondas senoidais (FADILI, 2014), e estas propagam-se no contato oceano-aquífero para o seu interior, o que causa a oscilação no nível piezométrico dos aquíferos conectados.

O estudo da oscilação no nível piezométrico permite entender a interação maré-aquífero e como esta é influenciada consoante a distância à costa. Segundo Todd (1959), não só a maré oceânica influencia direta e indiretamente as alterações das flutuações piezométricas num poço, mas a precipitação e a pressão atmosférica, entre outros fatores, poderão provocar essa mesma variação, sendo o seu

efeito menos significativo. É notável também que os efeitos são sentidos mais fortemente nos aquíferos confinados que nos livres, onde a atenuação da oscilação da onda é mais forte. O monitoramento de poços costeiros tem sido um objeto de estudo explorado por diversos autores, que têm como objetivo geral determinar as características hidrodinâmicas em aquíferos (LI e JIAO, 2001; FADILI *et al.*, 2012; FADILI, 2014).

O objetivo deste estudo é, portanto, analisar a influência da maré oceânica no aquífero confinado costeiro Emborê na Bacia de Campos. Assim, a observação da oscilação do nível de água em um poço de monitoramento (UFRJ 05) permitiu obter parâmetros da hidrodinâmica do aquífero, tal como a difusividade hidráulica. O resultado deste estudo é de extrema importância para entender o comportamento do corpo aquífero e auxiliar nos processos de gestão de seus recursos hídricos, já que este tem um alto potencial hídrico e uma grande demanda socioeconômica na área, que tem sido afetada pela escassez hídrica e pelo desenvolvimento crescente da população, o que leva a um aumento das áreas de produção agrícola.

Estudos hidrogeológicos na região têm sido feitos ao longo dos anos (SILVA JR. *et al.*, 2014, entre outros), mas as características hidrodinâmicas ainda carecem de estudos mais aprofundados. Silva Jr. *et al.* (2014) estudaram na região a interação maré-aquífero, mas com um período de apenas de 2 dias em um poço localizado a 200 metros da costa, em que se observou que havia uma clara influência da maré no nível piezométrico. No estudo atual, aplicou-se um período de oito meses de modo a obter-se informação em períodos de seca e de chuva. Isso permitiu uma avaliação muito mais precisa e detalhada dos efeitos naturais que provocam variações na piezometria do Aquífero Emborê na área do estudo.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área do estudo situa-se na localidade de Farol de São Tomé, no município de Campos dos Goytacazes, norte do estado do Rio de Janeiro, onde está o poço UFRJ 05, no qual

realizou-se o monitoramento proposto, como se verifica na Figura 1. A área de estudo é uma zona costeira, estando o poço situado a uma distância de 422 m da linha de costa. O estudo é inserido numa das porções geologicamente mais estudadas do Brasil, a Bacia de Campos, e em um dos aquíferos mais importantes do

estado do Rio de Janeiro, o Aquífero Emborê. A região é limitada a este pelo Oceano Atlântico, a norte pelo Arco de Vitória, onde se inicia a Bacia de Espírito Santo, e a sul pelo Alto de Cabo Frio, que limita a Bacia de Santos e Campos.

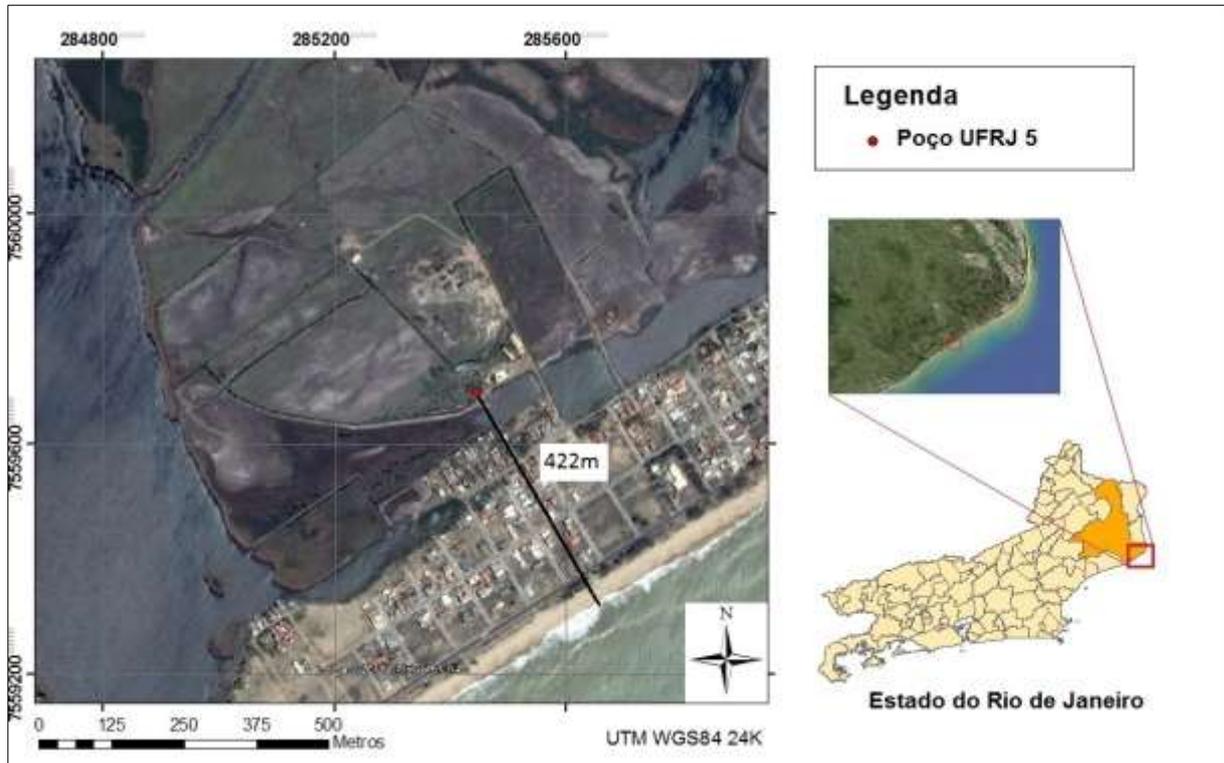


Figura 1 - Mapa de localização do poço UFRJ 05 - Farol de São Tomé

Figure 1 - UFRJ 05 well location- Farol de São Tomé

A Bacia de Campos, segundo Silva Jr. et al. (2014), apresenta em sua porção emersa depósitos sedimentares de idade Cenozoica. A Formação Emborê, de idade terciária, não é representada por afloramento (CPRM, 2001), e constitui alvo de estudo de vários autores (SCHALLER, 1973; GAMA JR., 1977; RANGEL *et al.*, 1994; WINTER *et al.*, 2007; SILVA JR. *et al.*, 2014). A estratigrafia da Bacia de Campos foi descrita por Winter et al. (2007), o qual subdivide a Formação Emborê em três membros:

- Membro São Tomé: sedimentos conglomeráticos e arenitos de fandelas e deltas depositados desde o Turoniano até o recente;
- Membro Siri: rochas carbonáticas formadas por bancos recifais de algas

vermelhas, com idade do Oligoceno ao Mioceno;

- Membro Grussaí: Carbonatos platformais, representados por calcarenitos, calcirruditos bioclásticos, principalmente constituídos por algas vermelhas, quartzosos, com matriz micrítica, ocorrendo, ainda diamictitos e intercalações de arenitos macios ou laminados, siltitos argilosos e margas com idade do Eoceno ao Recente.

Os sedimentos da Formação Emborê estariam associados a um ambiente deltaico. Relativamente à hidrogeologia, nesta região encontram-se as maiores reservas de água do Estado do Rio de Janeiro. Segundo Silva Jr. *et al.* (2014) a parte emersa da Bacia de Campos encontra-se dividida em duas unidades aqui-

feras: Aquífero Fluviodeltaico e Aquífero Emborê.

O Aquífero Fluviodeltaico, de idade quaternária, é classificado como um sistema livre que ocorre a sudoeste do município de Campos de Goytacazes, enquanto o Aquífero Emborê, de idade terciária, é dividido em “Emborê stricto sensu” que se encontra predominantemente na região de Cabo de São Tomé, e em “Emborê fácies São Tomé”, que se encontra a sul e a norte do Cabo de São Tomé. A distinção destes dois aquíferos deve-se a diferentes características sedimentológicas e hidroquímicas que ocorrem no local.

### 3 APLICAÇÃO METODOLÓGICA

Aplicou-se uma sequência de ações para o desenvolvimento do trabalho, descrita a seguir:

- Monitoramento e aquisição de dados

O poço UFRJ 05 (Figura 2) tem uma profundidade de 130 metros e os filtros estão inseridos em camadas que captam o Aquífero Emborê. Um sensor multiparamétrico (*Leveloger Model 3001* da Solinst, tipo F100/M30-50mS) foi instalado a 8 m de profundidade (Figura 3) a partir da superfície do

terreno. No período de 16 de agosto de 2014 a 16 de abril de 2015, este sensor foi programado para fazer medições a cada 6 horas. As datas foram escolhidas de modo a abranger as estações do ano, do inverno de 2014 ao outono de 2015, e comparar períodos de seca (de agosto a setembro) e chuva (restante do período). As leituras que o sensor multiparamétrico realiza são: condutividade elétrica, temperatura e altura da coluna de água, que é o destaque neste trabalho.



Figura 2 - Poço UFRJ 05

Figure 2 - UFRJ 05 well

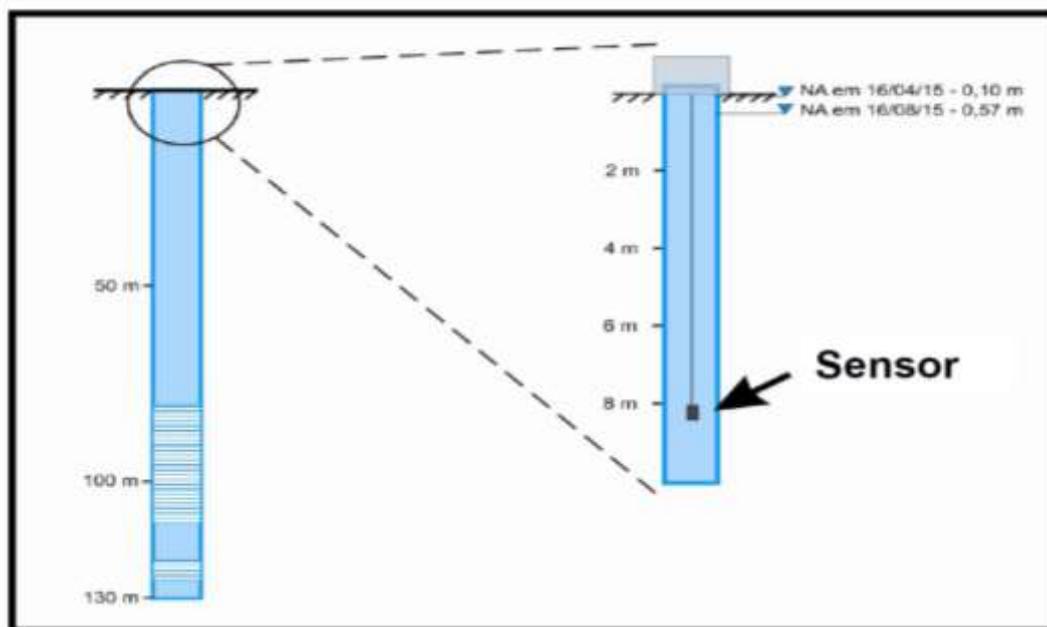


Figura 3 - Esquema do poço UFRJ 05 e localização do sensor multiparamétrico

Figure 3 - UFRJ 05 well sketch and positioning of multiparameter sensor

Foram coletados dados de meteorologia - precipitação, obtidos na base de dados dos sites do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Banco de Dados Meteorológicos para ensino e pesquisa (BDMEP) e Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (Cptec/INPE); e de alturas da maré, obtidos no site da Marinha do Brasil. Ambos conjuntos de dados (precipitação e variações de maré) foram também considerados no estudo. Isto permitiu identificar e detalhar as razões de variações de temperatura, coluna de água e conseqüentemente, no aquífero, avaliar o comportamento deste corpo hídrico e obter os seus parâmetros hidráulicos.

- Correção de dados

Os dados coletados a partir do sensor multiparamétrico tiveram de ser corrigidos a partir da pressão atmosférica, visto que os dados de altura de coluna de água sofrem com a variação desta. Assim, informações de pressão atmosférica da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram recolhidas e corrigidas para os dados de altura de coluna de água.

- Equação da difusividade hidráulica

A influência da maré nos poços piezométricos resulta em variações senoidais que podem ser calculadas a partir da difusividade hidráulica de aquíferos.

A difusividade hidráulica é o parâmetro que rege a propagação da onda que influencia um aquífero saturado e pode ser expresso em:

$$D = \frac{T}{S} \quad (1)$$

Onde:

D= difusividade hidráulica

T= Transmissividade (m<sup>2</sup>/dia)

S= Coeficiente de armazenamento (adimensional)

Autores como Jacob (1950), Ferris (1951), Todd (1959) Almeida e Silva (1983), Li Jiao (2001), Capaccioni et al (2005) e Fadili et al (2012) processaram a equação da difusividade de modo a determinar parâmetros hidrodinâmicos a partir da análise do efeito da maré em aquíferos costeiros.

A equação que nos permite calcular a difusividade hidráulica a partir da amplitude das oscilações pode ser dada por:

$$D = \frac{x^2 \cdot \pi}{t_0 \cdot \ln^2 \cdot (h/h_0)} \quad (2)$$

Em que:

x- distância da maré ao poço (m)

t<sub>0</sub>- período da maré (h)

h- amplitude de oscilação no piezômetro (m)

h<sub>0</sub>- amplitude da maré (m)

Pode também ser calculada a difusividade a partir do atraso, que corresponde ao tempo de chegada da onda da maré ao poço piezométrico, a partir de:

$$D = \frac{x^2 \cdot t_0}{4\pi \cdot t_1^2} \quad (3)$$

Onde:

t<sub>1</sub>- tempo de atraso (h)

As equações mencionadas anteriormente estão adaptadas para aquíferos confinados, sendo possível também colocar limites para aquíferos livres e semiconfinados. O cálculo da difusividade hidráulica a partir do estudo das oscilações do mar mostra-se um método mais simples de se obter e com maior amostragem, revelando fenômenos que acontecem no poço que não se manifestam quando se calcula a difusividade do aquífero a partir de ensaios de bombeamento (a partir da razão de transmissividade pelo coeficiente de armazenamento).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A programação e aquisição dos dados do sensor foram realizadas com auxílio do programa *Levelogger 1.5.0.7*<sup>®</sup>, resultando em 977 leituras de cada um dos dados (condutividade elétrica, temperatura e altura da coluna de água).

- Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) em soluções salinas é a capacidade da água conduzir

eletricidade devido à presença de íons. Esta propriedade modifica-se conforme diferentes variáveis, tais como temperatura, tipo e concentração de substâncias ionizadas dissolvidas na água, mobilidade de íons, etc. (Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2007). A CE para amostras de água utiliza normalmente as unidades de mili ou microSiemens por centímetro (mS/cm ou  $\mu\text{S/cm}$ ) e associa a salinidade à condutividade (CUSTODIO e LLAMAS, 1983) visto que estas apresentam uma correlação linear.

A Figura 4 descreve o comportamento da condutividade elétrica ao longo dos oito meses de medições. Como se verifica no gráfico da figura, o valor máximo obtido foi 0,59 mS/cm e o mínimo de 0,32 mS/cm, obtendo-

se uma variação de 0,27 mS/cm (Tabela 1). Constata-se que a variação dos dados foi sempre bastante pequena, não mostrando alterações significativas. Estes valores relevam a presença de uma água doce, o que já era de esperar visto que capta o aquífero Emborê, sendo este um aquífero profundo e confinado e que deste modo confirma-se que não está contaminado com a cunha salina marinha.

• Temperatura

As águas subterrâneas, segundo Custodio e Llamas (1983), têm uma temperatura pouco variável e normalmente correspondem à média anual das temperaturas atmosféricas de um certo local, incrementada pelo produto da temperatura e pelo gradiente geotérmico.



**Figura 4** - Evolução temporal da Condutividade Elétrica  
**Figure 4** - Evolution of Electrical Conductivity measurements

**Tabela 1** - Valores estatísticos de Condutividade Elétrica e Temperatura  
**Table 1** - Statistic values of Electrical Conductivity and Temperature

	Temperatura (°C)	Condutividade Elétrica (mS/cm)
Máximo	27,43	0,59
Mínimo	26,74	0,32
Média	27,26	0,40
Mediana	27,29	0,40
Desvio Padrão	0,06	0,01

A temperatura da água está inteiramente ligada à condutividade elétrica, isto é, quando a temperatura sobe a CE também aumenta, numa proporção de 2%/°C, segundo Custodio e Llamas (1983).

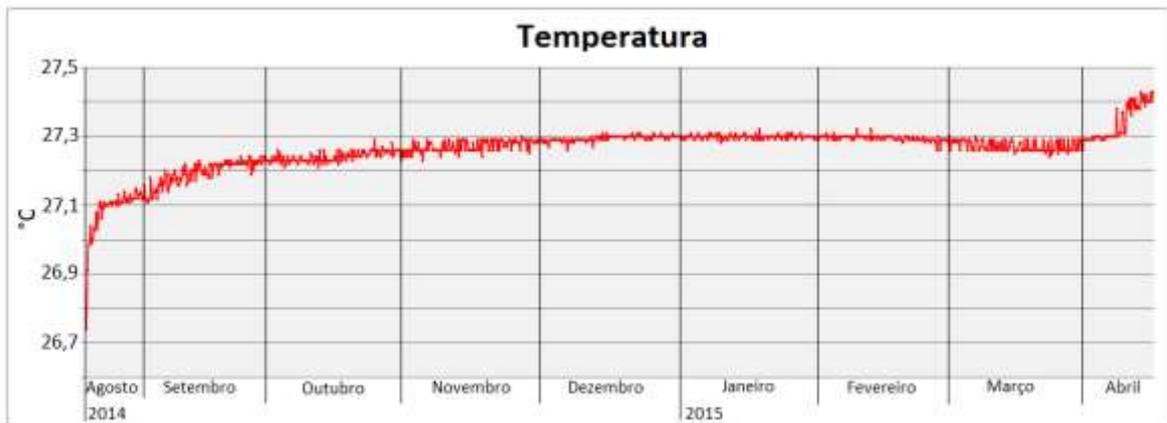
Neste estudo, a temperatura da água sofreu ao longo dos oito meses um ligeiro aumento da temperatura como é ilustrado na Figura 5, tendo como valor máximo 27,4°C e mínima de 26,7°C. Estes valores não mostram uma grande variação (máxima de 0,69°C) (Tabela 1), mas é possível observar no gráfico que houve também um ligeiro aumento da temperatura de agosto até ao final mês de novembro de 2014, e depois no mês de abril de 2015 uma subida mais acentuada. Do mês de dezembro de 2014 até o final de fevereiro de

2015, a temperatura manteve-se constante havendo uma pequena diminuição da temperatura no mês de março de 2015.

Seria mesmo de se esperar que a temperatura não sofresse alterações significativas, pelas pequenas variações naturais na água subterrânea e também devido ao fato do sensor estar instalado a 8 m de profundidade, verificando-se que as alterações meteorológicas diárias não afetam em larga escala a temperatura da água a esta profundidade.

- Oscilações piezométricas (variação da piezometria do aquífero)

*Análise da variação da carga hidráulica (coluna de água)*

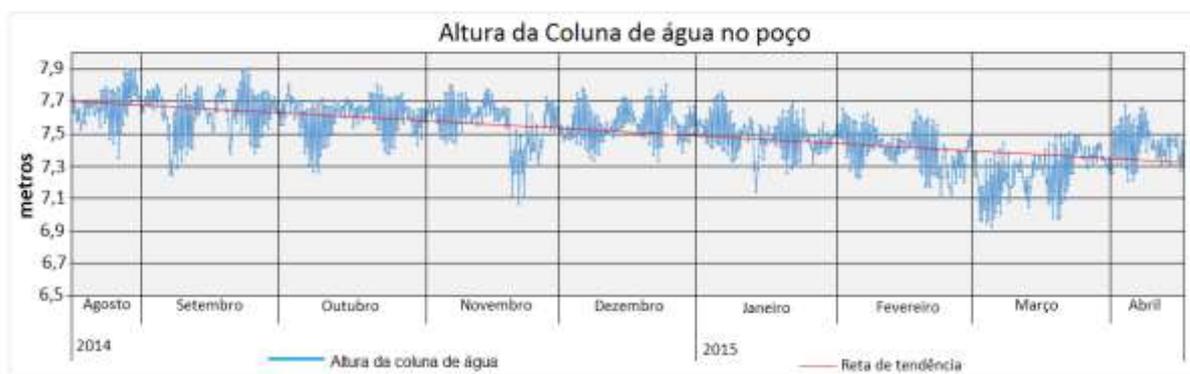


**Figura 5** - Evolução temporal da Temperatura  
**Figure 5** - Evolution of Temperature measurements

A figura 6 representa a evolução da coluna de água medida ao longo dos oito meses de medições (16 de agosto de 2014 a 16 de abril de 2015). Na observação do gráfico da Figura 6, verifica-se que este apresenta um sinal com bastantes oscilações da coluna de água no poço, através das medidas feitas pelo sensor multiparamétrico. Verifica-se que estas oscilações são constantes ao longo dos oito meses. As oscilações variam de amplitude, aumentado ou diminuindo conforme o nível de

água aumenta ou diminui. Como se observa na Tabela 2, o valor máximo obtido pelas medições da coluna de água a partir do sensor foi 7,908 m e o mínimo de 6,926 m, havendo uma diferença de 0,982 m, o que indica uma variação significativa desse parâmetro.

Deste modo, calculando-se estatisticamente os valores de média e mediana, nota-se que estes não indicam grande diferença de valores, o que vai de acordo com os valores obtidos pelo desvio padrão.



**Figura 6** - Evolução temporal da carga hidráulica no poço UFRJ 05  
**Figure 6** - Hydraulic head evolution in UFRJ 05 well

**Tabela 2** - Valores estatísticos da carga hidráulica  
**Table 2** - Statistic values of hydraulic head

Carga hidráulica (m)	
Máximo	7,908
Mínimo	6,926
Média	7,513
Mediana	7,531
Desvio Padrão	0,175

Na figura 6, nota-se que os valores do nível piezométrico do aquífero apresentam uma tendência de variação negativa ao longo dos meses, isto é, do mês de agosto de 2014 ao mês de abril de 2015 existe um

decréscimo da tendência geral das oscilações. Este decréscimo não indica que as amplitudes da coluna de água tenham diminuído, pois estas se mantiveram constantes. É de notar que no final do mês de fevereiro de 2015 deu-se início uma descida mais acentuada dos valores, indo até final do mês de março de 2015. Este evento será explicado na observação do gráfico de oscilações da maré oceânica com as oscilações do nível piezométrico do aquífero (ver a Figura 12).

Tendo em conta que os valores da coluna de água sofrem bastantes oscilações, calculou-se a média móvel (Figuras 7 e 8) de modo a se observar como o sinal medido pelo sensor pode ser atenuado de modo a suavizar a série temporal e destacar a tendência do ciclo da coluna de água.



**Figura 7** - Carga hidráulica no poço UFRJ 05 com o cálculo da média móvel (4 períodos)  
**Figure 7** - Hydraulic head in UFRJ 05 with moving average calculations (4 periods)



**Figura 8** - Carga hidráulica no poço UFRJ 05 com o cálculo da média móvel (16 períodos)  
**Figure 8** - Hydraulic head in UFRJ 05 with moving average calculations (16 periods)

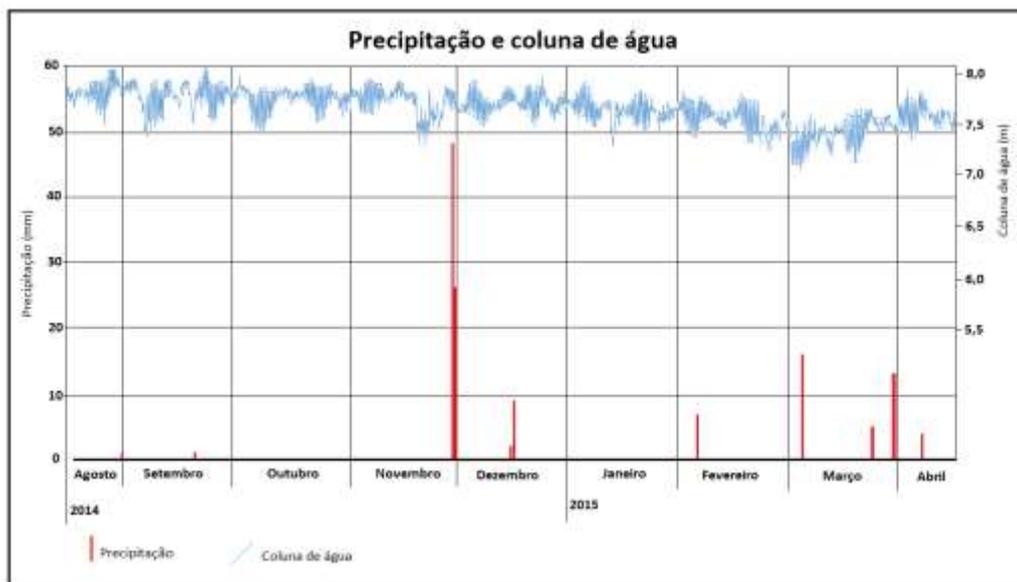
Deste modo, observam-se nas Figuras 7 e 8 as curvas das médias móveis calculadas. Na primeira, analisaram-se quatro períodos de cada vez na série temporal, e na segunda oito períodos. Assim, pode-se observar com maior clareza a tendência dos dados.

*Fatores que interferem na piezometria do aquífero:*

- Precipitação pluviométrica

A precipitação pluviométrica determina a recarga ao aquífero, isto é, a água da chuva ao se infiltrar levará a um aumento da sua carga hidráulica. Evidentemente, isso dependerá das características do aquífero (livre, confinado, nível piezométrico raso ou profun-

do). No caso do aquífero em estudo, este é confinado e por isso, quando existe precipitação pluviométrica, esta não se reflete diretamente sobre o aquífero. Como se pode observar na Figura 9, a precipitação ao longo dos oito meses de monitoramento foi escassa, refletindo a seca na região Norte Fluminense, que impactou toda a região Sudeste brasileira no período do estudo. Observa-se que, ao final de novembro de 2014, houve uma chuva com maior volume, mas a carga hidráulica não foi afetada pela precipitação continuando com o seu ciclo normal não influenciado. No mês de março de 2015, em que houve alta pluviosidade, de igual forma estas não influenciam a carga hidráulica no poço.



**Figura 9** - Gráfico de Comparação dos valores de precipitação e carga hidráulica  
**Figure 9** - Comparison of precipitation and hydraulic head values

- Maré

O estudo das flutuações das marés para o entendimento das oscilações do nível de água no poço em aquíferos costeiros é de vital importância, pois leva a uma compreensão de como os ciclos sinusoidais da maré afetam o nível piezométrico.

Como se pode observar na Figura 10, a maré comporta-se como um sinal rítmico, aumentando e diminuindo ao longo do tempo, havendo marés altas e marés baixas diariamente, tornando-se um padrão comum. Na observação do gráfico, nota-se que duas vezes por mês a amplitudes das marés aumentam para um máximo de forma gradual e, também duas vezes por mês, estas diminuem gradualmente para um mínimo, o que dá origem às

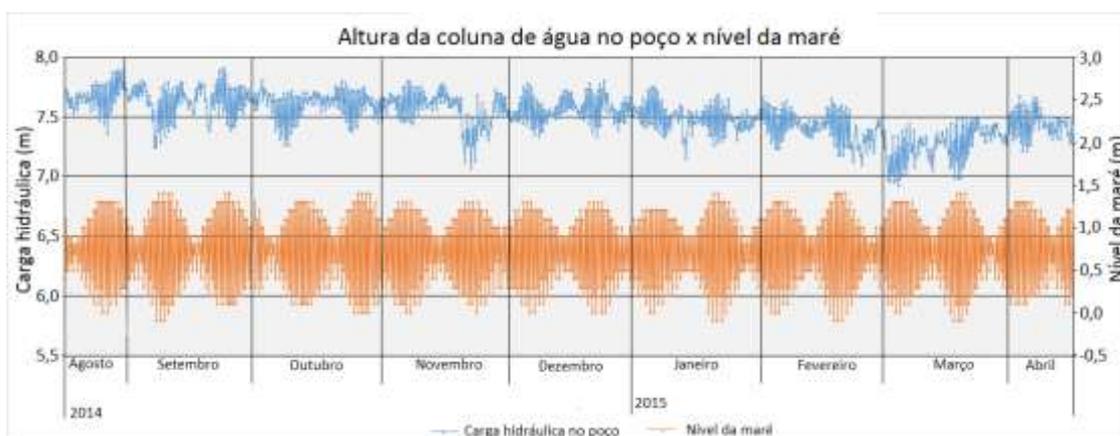
marés de Sizígia e de Quadratura.

Deste modo, agregaram-se os dados do nível da maré e os dados da coluna de água no poço, de modo a se poder observar como os sinais sinusoidais da maré afetam o poço costeiro a 422 m de distância do mar (Figura 11). Verificou-se que, apesar dos dados do poço apresentarem desvios, eles seguem um padrão semelhante aos dados do nível da maré. Assim, podem-se observar os mesmos padrões cíclicos nas duas linhas de medições. Observa-se que os dados do mês de novembro de 2014 e março de 2015 são os que melhor se ajustam entre si, enquanto que os meses de setembro de 2014, novembro de 2014 e janeiro de 2015 apresentam algumas variações inconstantes.



**Figura 10** - Evolução temporal da altura do nível da maré

**Figure 10** - Tidal level height evolution



**Figura 11** - Gráfico de comparação da carga hidráulica e nível da maré

**Figure 11** - Comparison of hydraulic head and tidal level

Na Tabela 3, podem-se observar os valores estatísticos para o nível da maré ao longo dos oitos meses. Identifica-se assim que o valor máximo da maré foi de 1,40 m e o mínimo de -0,1 m com relação ao nível médio do mar. Ao contrário do que aconteceu com a carga hidráulica, a média e a mediana já tomam valores diferentes com um desvio padrão de 0,447m.

**Tabela 3** - Valores estatísticos de nível da maré  
**Table 3** - Statistic values of tidal level

	Nível da maré (m)
Máximo	1,400
Mínimo	-0,100
Média	0,709
Mediana	0,800
Desvio Padrão	0,447

Assim, a síntese do estudo da carga hidráulica apresenta-se na Figura 12, com a visualização da carga hidráulica e do nível da maré. Nesta figura, observa-se a variação das marés e da carga hidráulica do aquífero segundo os ciclos de Lua. Verifica-se que estes ciclos de maré são identificáveis nos dados de altura de água no poço.

Como foi mencionado anteriormente, do final do mês de fevereiro até o final do mês de março de 2015, existe uma diminuição dos valores de altura de água. Este caso pode ser consequência de uma época extremamente seca, uma seca histórica, como se pode observar na reta de tendência (Figura 12). Sugere-se que este período de maior rebaixamento pode também ser devido à época do ano ser de alto consumo de água, levando a um maior bombeamento de água dos poços ao redor.

Outra época de interesse que pode ser observada é o período compreendido entre o final do mês de setembro e o início do mês de outubro de 2014, em que ocorre um fenômeno não identificável pelas marés de sizígia ou quadratura, o que leva a pensar que poderá ser uma maré de tempestade, visto que a amplitude das marés aumenta repentinamente e registraram-se eventos tempestuosos nessa época na região.

### *Cálculo da difusividade hidráulica*

Como foi mencionado, a difusividade hidráulica é um parâmetro que fornece informações importantes sobre o funcionamento do aquífero em estudo. Ela rege a propagação da onda que influencia um aquífero saturado. Para calcular a difusividade hidráulica é necessário calcular o tempo de atraso da onda ao poço e o período médio da maré (Tabela 4).

**Tabela 4** - Valores estatísticos de tempo de atraso e período da maré

**Table 4** - Statistic values of lag time and tidal period

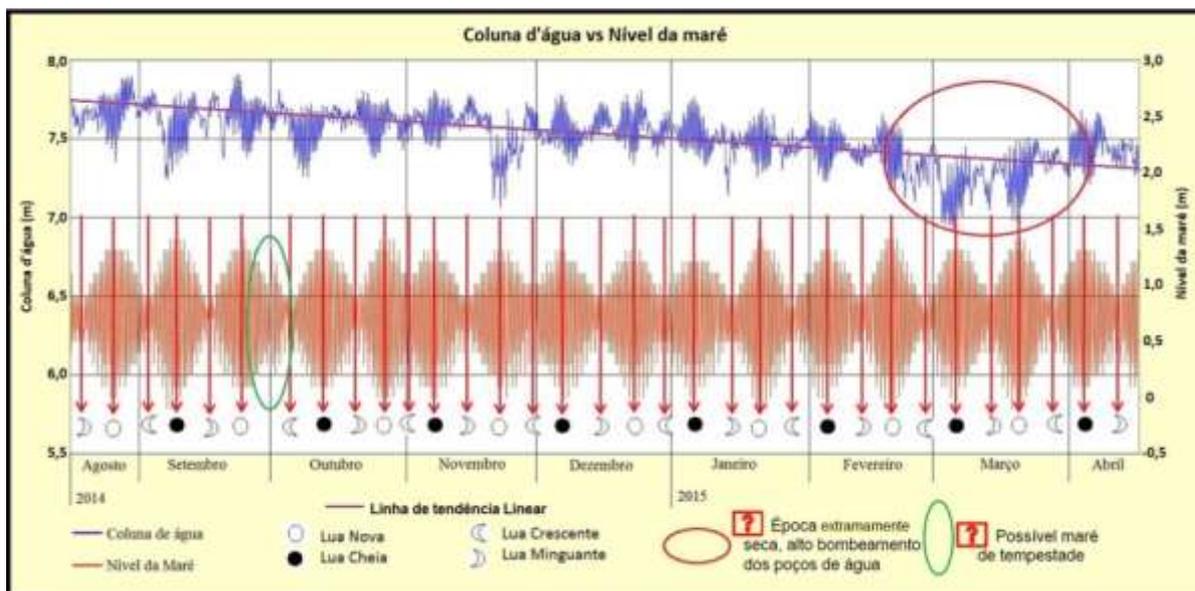
	Tempo de atraso- $t_l$ (h)	Período da maré- $t_0$ (h)
Média	3:01	12:31
Mediana	3:04	12:21
Desvio Padrão	1:40	0:33

Assim, pela fórmula (3) pode-se calcular a difusividade hidráulica a partir dos dados da distância da maré ao poço, tempo de atraso e período de maré.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados do cálculo da difusividade hidráulica, com valores de atraso de 1 a 6 horas. Com isso, foi possível avaliar como o valor da difusividade hidráulica pode variar bastante em função do tempo de retardo selecionado na equação, o que permite vislumbrar a grande incerteza nesta estimativa.

Os valores obtidos são bastante altos, indicando uma grande capacidade do aquífero para a propagação dos efeitos mecânicos/hidráulicos, isto é, o movimento das diferenças de alturas da maré é percebido no aquífero. Este fenômeno foi observado na Figura 12, que representa a variação da carga hidráulica pelo nível da maré, em que a oscilação de ambos apresenta o mesmo movimento.

Verifica-se que os valores da difusividade hidráulica dependem diretamente do tempo de atraso, isto é, quanto maior o  $t_l$  menor será a difusividade hidráulica (Tabela 5). Observa-se, também, que uma maior difusividade hidráulica resulta quando se utilizam valores de 1 hora de atraso.



**Figura 12** - Gráfico de oscilações da maré oceânica com as oscilações do nível piezométrico do aquífero  
**Figure 12** - Ocean tide oscillation and aquifer piezometric level evolution

**Tabela 5** - Valores estatísticos da difusividade hidráulica (em vermelho os valores máximos obtidos e em verde os valores mínimos)

**Table 5** - Statistical values of hydraulic diffusivity (red- maximum values, green- minimum values)

	$t_0(h)$				
	Difusividade ( $m^2/dia$ )	Máximo	Mínimo	Média	Mediana
		14:15	11:57	12:31	12:21
1		4.815.219,87	3.937.267,10	4.188.807,91	4.155.323,58
2		1.203.802,47	984.316,77	1.047.201,98	1.038.830,90
3		535.023,32	437.474,12	465.423,10	461.702,62
4		300.950,62	246.079,19	261.800,49	259.707,72
5		192.608,39	157.490,68	167.552,32	166.212,94
6		133.755,83	109.368,53	116.355,78	115.425,66

Deste modo, para se ter uma estimativa comparativa, utilizaram-se os valores de transmissividade e coeficiente de armazenamento obtidos em ensaios de bombeamento no aquífero, respectivamente  $291 m^2/dia$  e  $2,32 \times 10^{-5}$  (SILVA JR. *et al.*, 2014) para o cálculo da difusividade hidráulica. Estes valores foram obtidos a partir de testes de bombeamento no poço UFRJ 05 (Tabela 6).

Devido aos resultados dos valores do tempo de atraso da maré, em que a média foi de 3:01h e o desvio padrão 1:40h, optou-se pelos valores de difusividade hidráulica com o tempo de atraso entre 2 e 4 horas, para comparar com os valores de difusividade a partir do teste de bombeamento (Tabela 6).

**Tabela 6** - Valores comparativos de difusividade hidráulica

**Table 6** - Comparative values of hydraulic diffusivity

Difusividade ( $m^2/dia$ )	Sensor multiparamétrico (de 2 a 4 horas)	Teste de Bombeamento
	1.203.802,47 a 259.707,62	1.254.310,30

Os testes de bombeamento em poços têm custos mais elevados, pois a demanda por pessoal especializado é maior, o equipamento é mais moroso de ser instalado e necessita de pelo menos 24h de ensaio direto com mão-de-obra disponível no local. Em comparação, ao se fazer o estudo da difusividade hidráulica a partir da utilização do sensor multiparamétrico, este é automático, medindo os valores conforme o manuseador desejar e poderá estar no poço por tempo virtualmente ilimitado, sendo só necessário extrair quando se desejar.

Por outro lado, o custo dos sensores é relativamente alto, e a variabilidade de valores de difusividade hidráulica é muito grande, sendo bastante difícil estabelecer o valor “correto” a ser empregado para obtenção do parâmetro. De qualquer forma, os valores obtidos com tempo de atraso de 2 horas são semelhantes, e não fogem à mesma ordem de grandeza do método de bombeamento. Deste modo, compararam-se dois métodos para obter a difusividade hidráulica com duas técnicas totalmente distintas.

Em termos práticos, não seria possível substituir a obtenção de parâmetros do aquífero utilizando o método da medida de atenuação da onda mecânica da maré em detrimento dos ensaios tradicionais de interferência entre poços, por duas razões: o tempo de aquisição de dados é muito grande, uma vez que há grande variabilidade de resultados da difusividade conforme o ciclo de maré analisado; os resultados fornecem a difusividade hidráulica, havendo necessidade de estimativa dados adicionais para a obtenção de parâmetros individuais do aquífero (p.ex.: condutividade elétrica e coeficiente de armazenamento). Por outro lado, dispendo-se de uma série longa de dados de variação de maré, salinidade e temperatura do aquífero, abrem-se perspectivas interessantes em termos investigativos quanto à natureza do aquífero e para a formulação de

hipóteses conceituais de funcionamento do corpo hídrico. A possibilidade de comparação direta e uso conjunto dos resultados de um ensaio de interferência com um monitoramento das oscilações de maré representa uma oportunidade valiosa para pesquisar a natureza hidrodinâmica do aquífero. Para o objetivo central do trabalho, de entendimento da influência das marés oceânicas no aquífero costeiro, o método aplicado mostrou-se adequado para este fim, mostrando a diversidade de dados que pode haver com uma grande série temporal, com as diferentes estações do ano e eventos climatológicos, influenciados ou não antropicamente, que podem afetar os resultados.

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo o estudo hidrogeológico do Aquífero Emborê a partir de parâmetros obtidos pelo sensor multiparamétrico em poço de monitoramento de aquífero costeiro do norte do Estado do Rio de Janeiro. Deste modo, acompanhou-se a variação temporal da temperatura, condutividade elétrica e carga hidráulica (altura da coluna de água) no poço UFRJ 05, verificando-se que as duas primeiras, ao longo dos oito meses de medição, praticamente não sofreram oscilações nos seus valores, enquanto a carga hidráulica apresentou significativas variações.

Assim, analisou-se o gráfico da coluna de água, verificando-se que este sofre oscilações cíclicas, e isto motivou um estudo para avaliar os fatores que afetam a altura da água num poço costeiro a 422 m de distância da linha do mar. Ao se analisar a precipitação verificou-se que esta não afetava os níveis de água, nem mesmo após chuvas intensas. Isto confirmou o caráter confinado do Aquífero Emborê, sendo a sua zona de recarga principal distante. Os dados do nível da maré local apre-

sentam os efeitos dos ciclos de maré de quadratura e de sizígia e verificou-se que os dados de altura de água no poço condizem com este padrão, apresentando a mesma forma sinusoidal cíclica. A partir deste resultado, percebeu-se que a maré afeta diretamente a carga hidráulica no poço de monitoramento. Assim, obteve-se a difusividade hidráulica do aquífero a partir do tempo de atraso entre a maré e o poço.

Há grande incerteza na estimativa dos parâmetros com este método, mas ele fornece características adicionais do aquífero que permitem consubstanciar o modelo conceitual do corpo hídrico. Relativamente à utilização do

sensor multiparamétrico seria interessante que o intervalo de tempo de aquisição dos dados fosse mais curto.

Outra sugestão para trabalhos futuros diz respeito à ampliação do intervalo de tempo de aquisição de dados, bem como mais pontos de medida.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Recursos Humanos da ANP PRH-234-PB-UFRJ pelo auxílio financeiro na execução do projeto.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C.; SILVA, M. J. L. Novas Observações Sobre o Efeito de Maré em Aquíferos Costeiros do Algarve. **Boletim da Sociedade Geológica de Portugal**, 24, p. 289-293, 1983.
- CAPACCIONI, B.; DIDERO, M.; PALETTA, C.; DIDERO, L. Saline intrusion and refreshing in a multi-layer coastal aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. **Journal of Hydrology**, 307:1-16, 2005.
- CPRM - Serviço Geológico Nacional. Rio de Janeiro, **Projeto Rio de Janeiro** (geologia, geomorfologia, geoquímica, geofísica, recursos minerais, economia mineral, hidrogeologia, estudos de chuvas intensas, solos, aptidão agrícola, uso e cobertura do solo, inventário de escorregamentos, diagnóstico geoambiental). Rio de Janeiro: CPRM: CD, 2001.
- CPRM - Serviço Geológico Nacional. **Manual Medição "in loco": Temperatura, pH, Condutividade Elétrica e Oxigênio Dissolvido**, Versão maio, 2007.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. **Hidrogeologia subterrânea**. Barcelona. Editorial Omega. v I e II, 1983.
- FADILI, A.; MEHDI, K.; MALAURENT, P. H.; RISS, J.; BOUTAYEB, K.; GUESSIR, H. Influence de la marée océanique sur la variation du niveau piézométrique de l'aquifère karstique côtier de Oualidia (Maroc), **Africa Geoscience Review**, v. 19, n. 3, p. 135-150, 2012.
- FADILI, A. **Etude hydrogéologique et géophysique de l'extension de l'intrusion marine dans le sahel de l'Oualidia (Maroc)**: analyse statistique, hydrochimie et prospection électrique. 2014. 289 p. Thèse univ. Chouaib Doukkali, Maroc
- FERRIS, J. G. Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility, Assemblée Générale de Bruxelles, Assoc. Intl. a' **Hydrologie Scientifique**, v. 2, p. 148-15, 1951.
- GAMA JUNIOR, E. G. **Sistemas Depositionais e Modelo de Sedimentação das Formações Campos e Emborê, Bacia de Campos**. Rio de Janeiro, Brasil, 1997. 2v. Tese de Doutorado. IG/USP
- JACOB, C. E. Flow of ground water. In: Rouse, H. (Ed). **Engineering hydraulics**. Wiley, Hoboken, N.J., p. 321-386, 1950.
- LI, H.; JIAO, J. J. Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea. **Water Resources Research**, v. 37, no. 5, p. 1165-1171, 2001.
- LI, H.; JIAO, J. J. Review of analytical studies of tidal groundwater flow in coastal aquifer systems. In: **Proceedings of the International Symposium on Water Resources and the Urban Environment**. Wuhan, PR China, p. 9-10, Nov. 2003.
- LI, H.; LI, G.; CHENG, J.; BOUFADEL, M. C. Tide-induced head fluctuations in a confined aquifer with sediment covering its outlet at the sea floor. **Water Resources Research**, v. 43: W03404, 2007a.
- RANGEL, H. D.; MARTINS, F. A.; ESTEVES, F. R.; FEIJÓ, F. J. Bacia de Campos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 8, n.1, p. 203-217, jan./mar. 1994
- SCHALLER, H. Estratigrafia da Bacia de Campos, In:

**Anais do XXVII Congresso de Geologia**, v. 3. SBG. Aracaju, SE. Out. p. 247– 258, 1973.

SILVA JR, G. C.; ALVES, M. G.; MELLO, C. L. et al. **Projeto Avaliação Hidrogeológica da Formação Emborê na porção emersa da Bacia de Campos visando o descarte de água de produção de petróleo.** Programa Gerenciamento de Águas no Segmento Produção de Petróleo da ANP/PETROBRAS. 2014. Convênio entre Petróleo Brasileiro S/A - Petrobras, Universidade Federal do Rio de Janeiro–UFRJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – UENF

(Instituições Executoras) e Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos – COPPE-TEC (Instituição Conveniente).

TODD, D. K. **Hidrologia de águas subterrâneas.** São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1959.

WINTER, W. R.; JAHNERT, R. J; FRANÇA, A. B. Bacia de Campos. **Boletim de Geociências da Petrobras**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 511-529, maio/nov. 2007.