

INFLUÊNCIA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO NÍVEL DE ÁGUA NO AQUÍFERO LIVRE RASO EM CENÁRIO AMAZÔNICO

INFLUENCE OF EVAPOTRANSPIRATION ON THE WATER LEVEL IN A SHALLOW UNCONFINED AQUIFER IN AN AMAZONIAN SCENARIO

Marcus Victor Almada da Silva^a, Giovanni Chaves Penner^a, Athaydes Silva Júnior^a,
Veronica de Nazaré Ramos Viana^a

^aUniversidade Federal do Pará – UFPA

marcus.almada.silva@itec.ufpa.br, penner@ufpa.br, katiucia@ufpa.com.br, athaydes@ufpa.br, veronicaviana@usp.br.

Submissão: 14 de novembro de 2024 Aceite: 16 de abril de 2025

Resumo

A estimativa da evapotranspiração (ET) é de extrema importância para as características hidrológicas de um determinado local. O método de Penman-Monteith é considerado como de fácil ajuste a diversas localidades, sendo necessários dados meteorológicos como informação de entrada, resultando na evapotranspiração de referência tanto utilizando dados diários quanto horários. No presente estudo, a evapotranspiração de referência horária foi estimada para o período de 26 de agosto de 2023 a 25 de agosto de 2024 dentro do campus da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Belém. Foram usados registros meteorológicos de duas estações meteorológicas, uma localizada no campus da UFPA e outra na cidade de Belém gerenciada pelo INMET. Para gerenciamento dos registros meteorológicos foi utilizado o programa Excel. Os dados de níveis de água subterrâneo, foram coletados em poço de monitoramento instalado na UFPA, dotado um transdutor de pressão, tipo logger, com amplitude de 5 m e precisão de $\pm 0,1\%$, que armazena os níveis em intervalos de 15 minutos. Os resultados indicam alta amplitude de evapotranspiração nos horários de 12 h às 15 h. Para uma análise mais precisa das características do aquífero subterrâneo, foi aplicado um filtro digital para remover o efeito das marés sobre o nível de água do poço. Com essa filtragem, foi possível constatar que a evapotranspiração exerce influência sobre o nível de água, porém não é o processo dominante. Esse trabalho evidencia que as variabilidades atmosféricas e climáticas impactam diretamente a disponibilidade hídrica no aquífero e aponta para a necessidade de se considerar o efeito da evapotranspiração no nível de aquíferos livres rasos.

Palavras-chave: filtro digital; amazônia; características hidrológicas; penman-monteith; água subterrânea.

Abstract

The estimation of evapotranspiration (ET) is extremely important for the hydrological characteristics of a given location. The Penman-Monteith method is considered easily adaptable to various locations, requiring meteorological data as input, resulting in reference evapotranspiration using both daily and hourly data. In the present study, hourly reference evapotranspiration was estimated for the period from August 26, 2023, to August 25, 2024, on the campus of the Federal University of Pará (UFPA) in Belém. Meteorological records from two weather stations were used, one located on the UFPA campus and the other in the city of Belém, managed by INMET. The Excel program was used to manage the meteorological records. Groundwater level data were collected from a monitoring well installed at UFPA, equipped with a pressure transducer, logger type, with a range of 5 m and an accuracy of $\pm 0.1\%$, which stores levels at 15-minute intervals. The results indicate high evapotranspiration amplitude between 12:00 PM and 3:00 PM. For a more precise analysis of the characteristics of the subsurface aquifer, a digital filter was applied to remove the effect of tides on the well's water level. With this filtering, it was possible to observe that evapotranspiration influences the water level, although it is not the dominant process. This work highlights that atmospheric and climatic variabilities directly impact water availability in the aquifer and points to the need to consider the effect of evapotranspiration on the level of shallow unconfined aquifers.

Key-words: digital filter; Amazon; hydrological characteristics; penman-monteith; groundwater.

1 INTRODUÇÃO

A Floresta Amazônica desempenha um papel crucial na luta contra as intervenções humanas no clima global, atuando diretamente no balanço de carbono planetário. Isso ocorre devido à sua capacidade de capturar o carbono da atmosfera e armazená-lo nas árvores e no solo (Moham; Betts, 2011). Além disso, a Amazônia é fundamental para a estabilidade do clima regional, pois impulsiona grandes quantidades de vapor d'água (H₂O) originadas no Oceano Atlântico, transportando-as ao longo da América do Sul. Esse processo assegura a regulação do regime de chuvas em regiões como a Argentina, o Paraguai e o centro-sul do Brasil (Carneiro Filho, 2009).

Nesse contexto, Nobre et al. (2009) destacam que a região amazônica apresenta um clima equatorial chuvoso, praticamente sem estação seca, mas com significativa heterogeneidade espacial e sazonal na pluviosidade. Essa variação faz da Amazônia a região com o maior total pluviométrico anual. O conhecimento detalhado da distribuição espaço-temporal da precipitação é, portanto, essencial para compreender os sistemas locais e de grande escala que afetam a região, contribuindo para a evolução do clima e a sustentabilidade dos seus ecossistemas.

A Bacia Amazônica, que abriga a maior extensão de florestas tropicais do planeta, exerce uma influência significativa no clima local e global. Isso se deve aos fluxos de energia e água na atmosfera, além de seu papel no sequestro de carbono e na emissão de vapor d'água, que é fundamental para a manutenção da própria floresta. Além disso, a região possui uma rica diversidade cultural e biológica (Stickler et al., 2013). Por meio da evapotranspiração, as florestas tropicais bombeiam calor latente para a atmosfera, equilibrando o forte calor radiativo na superfície. Esse processo, aliado à convecção tropical, resfria a Amazônia e distribui calor para a circulação atmosférica global, tornando-a uma fonte troposférica de calor (Silva Dias et al., 1987 apud Marengo, 2009).

A evapotranspiração, por sua vez, é um fenômeno hidrológico complexo, influenciado por variáveis climáticas como precipitação, velocidade

do vento, insolação, umidade relativa e temperatura (Mohan; Arumugam, 1996). Além disso, fatores como a fase fenológica das plantas, a fertilidade do solo e o conteúdo de água no solo também afetam esse processo (Israelsen; Hansen, 1965). Como parâmetro mais importante para estimar as necessidades hídricas das plantas e do solo, a evapotranspiração é amplamente utilizada para quantificar a perda de vapor d'água para a atmosfera, combinando os processos de evaporação e transpiração (Doorenbos; Pruitt, 1977). O método de Penman-Monteith, recomendado pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), é o padrão para calcular a evapotranspiração de referência (ET_o), embora a escassez de estações meteorológicas em algumas regiões exija o desenvolvimento de abordagens mais simples para estimar esse parâmetro (Allen et al., 1989).

No que diz respeito aos recursos hídricos subterrâneos, os aquíferos livres desempenham um papel fundamental. Segundo Todd (1959) e Feitosa e Manoel Filho (2000), esses aquíferos são formados por camadas geológicas permeáveis próximas à superfície, com seu limite superior submetido à pressão atmosférica. O monitoramento desses aquíferos é essencial para garantir a disponibilidade hídrica sustentável, permitindo o controle do volume de água extraído e evitando a escassez, especialmente em regiões onde a água subterrânea é a principal fonte de abastecimento. Além disso, por estarem próximos à superfície, os aquíferos livres são mais vulneráveis à contaminação por atividades humanas, o que torna o monitoramento qualitativo ainda mais importante para a rápida identificação e mitigação de problemas.

Os filtros digitais são algoritmos utilizados para processar sinais digitais. Seu funcionamento consiste em remover informações que podem ser consideradas ruídos ou realçar componentes específicos do sinal. Estas ferramentas possuem uma ampla aplicabilidade, podendo ser utilizadas em áreas como o processamento de áudios e imagens, nas telecomunicações e na hidrologia (Oppenheim; Willsky, 2010).

Na análise de dados hidrológicos, os filtros

digitais são ferramentas valiosas. Eles são utilizados para remover ruídos e componentes indesejados que poderiam prejudicar a obtenção de informações de grande relevância. Dentre suas aplicações na hidrologia, pode ser citada a análise de frequência de fenômenos hidrológicos, como oscilações, periodicidades e variações em intervalos de tempo específicos. Outro uso dado aos filtros digitais na hidrologia é a separação de componentes e remoção de ruídos, que consistem na separação de variações de curto prazo (alta frequência), como por exemplo a variação das marés, das variações de longo prazo (baixa frequência), que podem ser causadas por eventos climatológicos e sazonais (Viana, 2024).

Por fim, a utilização de modelagem hidrológica representa um instrumento essencial para a compreensão do ciclo hidrológico. Ela fornece ferramentas para o manejo eficaz dos recursos hídricos em bacias hidrográficas, integrando os diversos processos e variáveis discutidos anteriormente, desde a evapotranspiração até o monitoramento de aquíferos e a análise de dados por meio de filtros digitais.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é identificar se há evidência da variação dos níveis da água subterrânea associados à evapotranspiração, ou seja, se a evapotranspiração provoca alteração nos níveis do aquífero livre, aplicando-se a equação de Penman-Monteith para calcular e quantificar a evapotranspiração de referência para intervalos horários em Belém.

3 METODOLOGIA

A área de interesse é o campus da Universidade Federal do Pará, sendo utilizada a estação meteorológica automática vinculada ao Instituto Tecnológico da Vale e ao Laboratório Estação Meteorológica, localizada na própria Universidade. Tal estação possui datalogger CR-1000 da Campbell Scientific, com pluviômetro TB-04, sensor de temperatura e umidade relativa do ar modelo MP155, produzido pela Vaisala, que faz leituras horárias diárias. Adicionalmente, para preenchimento da ausência de alguns registros, foi considerada a estação automática (A201) e a convencional (82191) – desta foi utilizado um

parâmetro que foi requerido na equação de Penman-Monteith – ambas gerenciadas pelo Instituto de Meteorologia (INMET) e localizadas nas cercanias da UFPA.

Para o estudo em questão foram utilizados os registros do poço de monitoramento PM-06, localizado no campus da UFPA, cujo monitoramento teve início em agosto de 2023 e permanece ativo até o presente momento. No entanto, optou-se por considerar especificamente o período de 4 de agosto de 2023 a 5 de setembro de 2024, pois dentro desse intervalo observou-se o menor número de falhas no monitoramento, garantindo maior confiabilidade e consistência dos dados. Para manter a uniformidade na análise, o mesmo período foi adotado para os registros da estação meteorológica, permitindo uma correlação adequada entre os dados hidrológicos e climáticos.

O PM-06 é monitorado com um transdutor de pressão, tipo logger, com amplitude de 5 metros e precisão de $\pm 0,1\%$ F.E.; portanto, esses transdutores usam a compensação de um barômetro de apoio para corrigir as variações de pressão atmosférica, com um algoritmo de linearização de dois pontos conhecidos, sendo que o erro total máximo resultante fica na ordem de ± 2 mm.

Os registros das variáveis meteorológicas da estação localizada na UFPA foram: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), com máxima, mínima e média; pressão atmosférica (mbar); velocidade do vento (m/s); precipitação (mm); umidade relativa do ar (%); radiação solar (W/m^2); temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$); temperatura de bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$) e pressão de vapor de saturação (mbar). O gerenciamento dos registros das variáveis meteorológicas, bem como o tratamento foi realizado com auxílio do programa Excel.

Os registros anteriormente mencionados foram aplicados na equação de Penman-Monteith, como exige a Equação (1), que é a mais indicada para registros horários, sendo possível alcançar, também, a evapotranspiração diária pela somatória de 24 h dos valores horários. Os valores foram calculados para uma superfície com grama com albedo de 0,23.

$$Eto(h) = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \left(\frac{37}{T + 273}\right) \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot U_2)} \quad (1)$$

Onde:

Eto(h) – Evapotranspiração de referência horária

(mm); Δ - Declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa/°C); R_n - Saldo de radiação líquida por hora (MJ/m².h); G - Fluxo de Calor no solo; γ - Constante psicrométrica; T - Temperatura (°C); U_2 - Velocidade do vento a dois metros de altura (m/s); e_s - Pressão de saturação de vapor (kPa); e_a - Pressão atual do vapor (kPa); C_d - Constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo considerada (C_d dia = 0,24 s/m para período diurno e grama curta; ou, C_d noite = 0,96 s/m para período noturno e grama curta).

A declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (Δ) pode ser calculada por

$$R_n = (Q_g \cdot (1 - r)) + \left\{ - \left[4,903 \cdot 10^{-9} \cdot T^4 \cdot (0,56 - 0,25 \cdot \sqrt{e_a}) \cdot \left(0,1 + 0,9 \cdot \frac{n}{N} \right) \right] \right\} \quad (3)$$

meio da Equação (2).

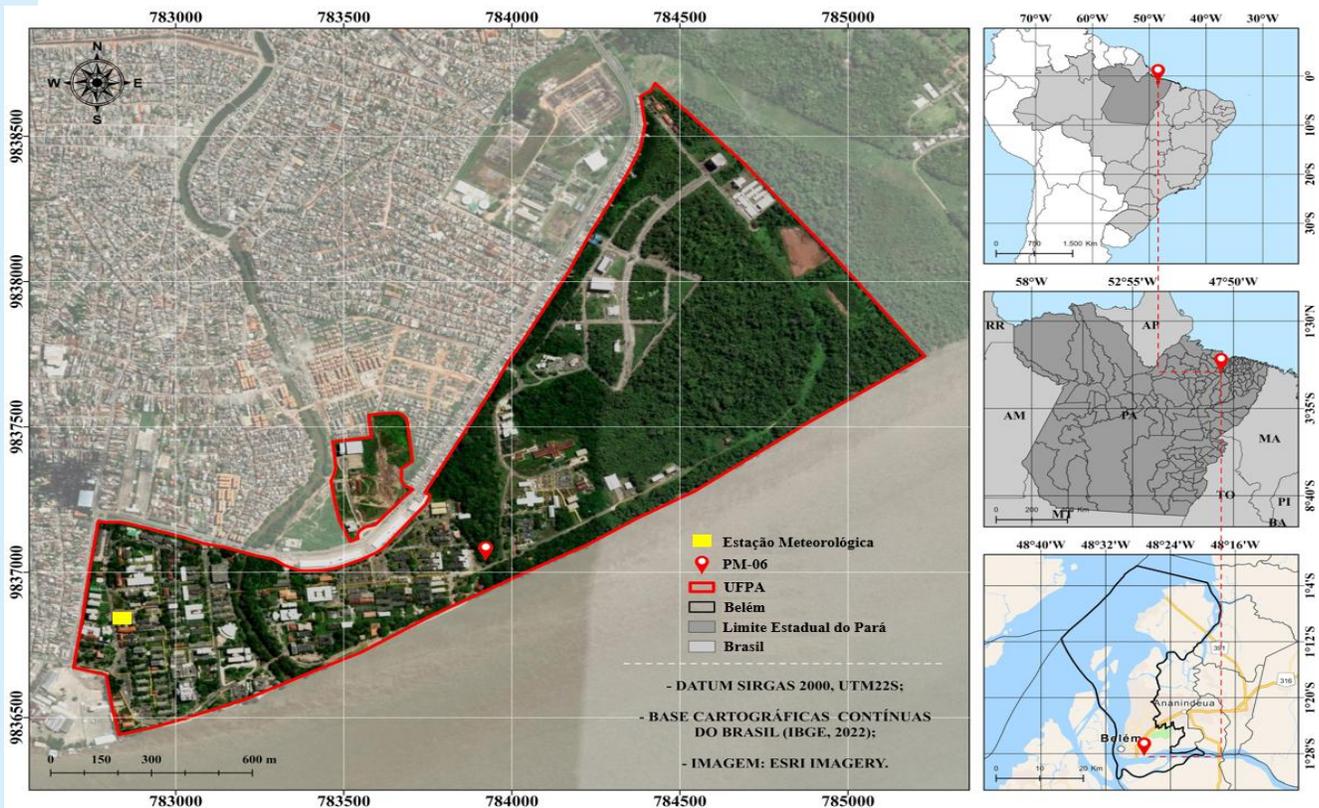
$$\Delta = \frac{4098(1,6108 \cdot \exp(\frac{17,27 \cdot T}{T+237,3}))}{(T+237,3)^2} \quad (2)$$

Onde:

T - Temperatura (°C);

O saldo de radiação líquida por hora (R_n) foi calculado pela Equação (3), pois a região de Belém é caracterizada como clima tropical úmido por apresentar temperatura média do mês mais frio sempre superior a 18 °C. Na equação considera-se a temperatura (T) em Kelvin.

Figura 1 - Localização da estação meteorológica e do poço de monitoramento no campus da UFPA



A velocidade do vento (U_2) pode ser calculada por meio da Equação (4), considerando-se que a sonda de medição da velocidade do vento na

estação se encontra a 10 metros de altura.

$$U_2 = \text{vel. do vento (Estação)} \cdot \frac{4,87}{\ln(67,8 \cdot 10 - 5,42)} \quad (4)$$

Pela característica pluviométrica de Belém há um contraste perceptível de dois períodos do ano, um muito chuvoso, no período de dezembro a maio, e outro pouco chuvoso, no período de junho até novembro, com uma quantidade significativa de radiação solar para ambos períodos. A umidade relativa do ar é geralmente alta devido à quantidade significativa de chuvas, ampla vegetação e grande disponibilidade de recursos hídricos em superfície ao redor da cidade, com a presença de vários cursos d'água, da baía do Guajará além dos lagos Bolonha e Água Preta, responsáveis também pelo abastecimento de água de parte da cidade.

As características do PM-06 estão diretamente correlacionadas com o comportamento de maré, uma vez que sua localização está próxima ao córrego Sapucajuba, um dos rios existentes dentro do campus da UFPA, e vertente do rio Guamá.

Para análise de dados provenientes de poços, Diniz, Arraes e Feitosa (2014) dizem que é necessário considerar a integração entre as águas subterrâneas e as águas superficiais. Em regiões em que os aquíferos subterrâneos estão próximos a corpos d'água superficiais e sob influência de marés, a flutuação diária dos níveis de água exerce pressão sobre os aquíferos, afetando as cargas hidráulicas. Estas variações provenientes das marés se mostram um empecilho na estimativa precisa de recargas das águas subterrâneas, por causarem significativas variações que não representam uma recuperação real do aquífero. Desta forma, dados brutos de variação de níveis não devem ser utilizados para determinação de recargas destes aquíferos.

Séries de dados sobre níveis de água em aquíferos livres em regiões costeiras incluem sinais significativos de marés. Esses ruídos são algo natural, mas que interferem fortemente na leitura e interpretação dos dados. Os filtros digitais são largamente aplicados nos campos da geologia e oceanográfica no intuito de suavizar curvas de séries temporais. Estas ferramentas filtram componentes de alta frequência, como é o caso das marés, e revelam sinais de frequência mais baixa (período de variação mais longo), os quais são relevantes nos estudos sobre as recargas dos aquíferos (Shirahata et al., 2016).

Em hidrologia e oceanografia, a principal aplicação para os filtros é a remoção ou atenuação das componentes de marés das variações de níveis com períodos mais longos. As marés são as subidas

e descidas periódicas identificadas em corpos d'água que estão ligados aos oceanos ou sob sua influência. Esse fenômeno é causado pela interação dos líquidos presentes na superfície terrestre com as forças gravitacionais dos astros mais próximos. De forma simplificada pode-se dizer que a maré é uma onda de grande comprimento, no entanto a sua formação é extremamente complexa, pois não é determinada por apenas um único fator, mas sim um conjunto de interações (Truccolo et al. 2019).

Os astros de maior influência sobre a maré terrestre são o Sol, devido ao seu tamanho e grande força gravitacional, e a Lua, pela sua proximidade à terra. É importante destacar a existência das marés reflexas, que são deformações geradas na região oposta à face da Terra que está voltada para o astro que provoca a maré. Este efeito é devido ao equilíbrio, existindo assim pelo menos duas regiões no planeta com níveis mais altos nas águas, as quais são denominadas marés diretas e reflexas (Cardoso, 2007).

Para a evidência de interação entre a evapotranspiração e o nível de água dos poços, foi aplicado o cálculo estatístico do coeficiente de correlação de Pearson (r), sendo utilizados os dados obtidos do registro de nível do PM-06 e da evapotranspiração calculada por meio do método de Penman-Moonteith. Na Equação (5) é possível observar a fórmula da Pearson.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}} \quad (5)$$

O resultado dessa equação pode variar entre -1 e 1, o sinal indica a direção da correlação (negativa ou positiva) enquanto que o valor indica a magnitude. A classificação do grau da correlação de acordo com os intervalos consta na Tabela 1.

O filtro escolhido para este trabalho, o Lanczos-cosine, foi selecionado por sua ampla utilização na literatura e pela eficiência na atenuação de componentes de alta frequência, como as marés. Essa capacidade de remoção de ruídos é essencial para isolar sinais de interesse em séries temporais, como as variações de longo prazo no nível freático. A implementação do filtro foi realizada utilizando-se a linguagem de programação Python, que oferece ferramentas robustas para processamento de dados e aplicação de técnicas de filtragem. O Lanczos-

cosine foi escolhido por suas características comparáveis a outros filtros amplamente reconhecidos, como o Filtro Butterworth, conhecido por sua resposta plana e ausência de ondulações nas bandas de passagem e rejeição. Essa propriedade garante uma atenuação eficiente de ruídos sem distorcer significativamente o sinal original, tornando-o ideal para aplicações em hidrologia, onde a precisão na remoção de interferências, como as marés, é crucial.

Tabela 1 - Classificação do grau de correlação de Pearson

COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO (R)	GRAU DE CORRELAÇÃO
0,01 a 0,19	Muito fraca
0,20 a 0,39	Fraca
0,40 a 0,69	Moderada
0,70 a 0,89	Forte
0,90 a 0,99	Muito forte

Fonte: (Reis, 2023).

As bibliotecas Python são um conjunto de módulos ou funções para objetivos ou tarefas específicas. Neste trabalho foram utilizadas as seguintes bibliotecas: numpy, biblioteca para manipulação eficiente de arrays e funções matemáticas; scipy.signal, módulo que contém funções para projetar e aplicar filtros digitais; matplotlib.pyplot, biblioteca para criação de gráficos e visualização de dados e pandas, biblioteca que fornece ferramentas para trabalhar com dados tabulares.

Para criação do filtro foi usado o comando `lanczos_window`, que cria uma janela de filtro, com base em um valor de corte (cutoff) e o tamanho da janela (`window_size`). O intervalo é ajustado para o comprimento desejado (`length`).

A janela de Lanczos é manipulada para garantir que ela tenha o comprimento correto. Para isso, a janela é cortada de acordo com o comprimento especificado, considerando-se o tamanho da mesma. A janela criada é normalizada dividindo todos os valores pela soma de seus elementos. Isso garante que o filtro não altere a amplitude dos dados quando aplicado. A função `apply_lanczos_filter` aplica a janela de Lanczos à série de dados utilizando a função de convolução `np.convolve`, suavizando os dados de entrada com o filtro gerado pela janela.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o período considerado (4 de agosto de 2023 a 5 de setembro de 2024) foi elaborado um digrama de caixa no formato de gráfico para as características da evapotranspiração média horária, exibido na Figura 2. Foi considerado o fotoperíodo das 7 h às 18 h por se tratar do período com maior presença de luz solar e maior radiação, e evidencia que o período de 12 h até às 15 h é o intervalo com maior evapotranspiração horária, e que o início (7 h) e fim (18 h) do fotoperíodo os valores quantificados são mínimos.

Os resultados exibidos na Figura 2 indicam grande variabilidade da evapotranspiração em praticamente todas as horas do dia, com uma amplitude maior nos horários de 12 h às 15 h. O horário de 14 h destaca-se como o momento de maior evapotranspiração, o que pode ser atribuído à intensidade da radiação solar nesse intervalo, e com a análise deste, é possível adotá-lo como ponto de referência para distinguir períodos.

Já para a configuração do comportamento do nível, os transdutores foram programados para fazer leitura de nível a cada 15 minutos. Para melhor visualização no gráfico, foi feito um recorte no período estudado. Foi feita a somatória semanal do período em questão, e foi selecionado o período de 10 dias em que a evapotranspiração atingiu os maiores valores, sendo assim o período onde o PM-06 estaria mais suscetível a sofrer variação decorrente de evapotranspiração. O período correspondente ao recorte foi de 22 de julho de 2024 a 1 de agosto de 2024.

Com a aplicação do filtro digital foi possível remover os registros de nível indesejados, suavizando os que sofrem a influência da maré, permitindo uma melhor análise dos dados. Na Figura 3 é possível observar o comportamento dos registros filtrados e não filtrados do nível de água no PM-06 no respectivo período estudado.

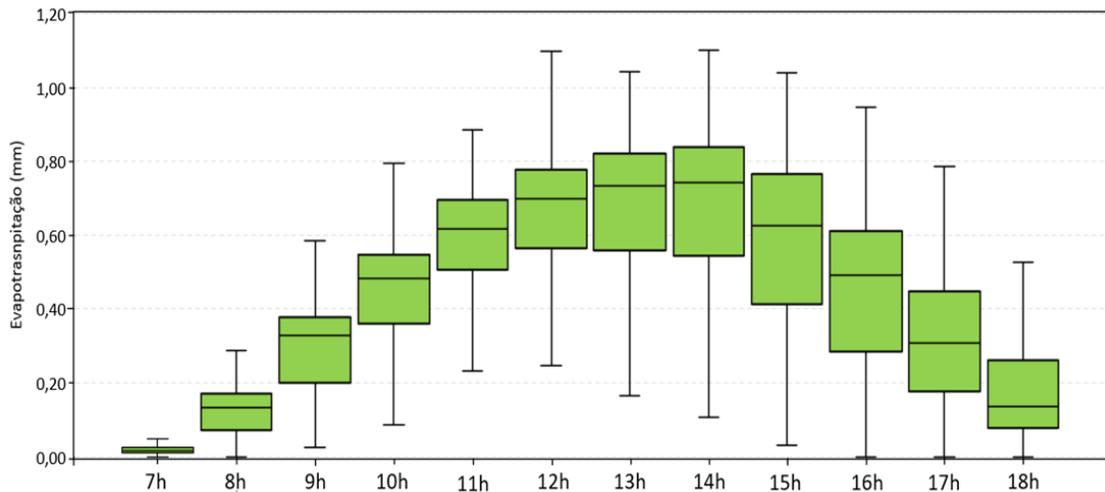
Vale ressaltar que no período em questão não houve ocorrências de precipitação, o que descarta sua influência no nível freático. Santos, Oliveira e Almeida (2019) destacam que

[...] a presença de vegetação nativa e práticas de manejo do solo, como a conservação de áreas de recarga, podem aumentar a infiltração e, conseqüentemente, a recarga dos aquíferos livres.

Outro fator que influencia a recarga dos aquíferos é o interfluxo, que é o fluxo lateral de água de outros aquíferos, e ocorre em áreas onde os aquíferos livres estão hidráulicamente conectados, permitindo-se a transferência de água de um

aquífero para outro devido a diferenças de pressão ou gradientes hidráulicos, somado aos tipos de solos da área de estudo, que podem ser argilosos ou arenosos, sendo a porosidade e a permeabilidade as principais diferenças entre eles.

Figura 2 - Comportamento da evapotranspiração média do fotoperíodo de 7 h às 18 h



Fonte: autores, 2024.

Os aquíferos livres desempenham um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente em regiões com climas semiáridos ou em áreas de grande demanda de água, como o Brasil. Em muitas regiões brasileiras, como o Nordeste, onde a escassez de água é uma preocupação constante, os aquíferos livres fornecem uma importante reserva estratégica de água para a população, além de servirem para a recarga de outros aquíferos mais profundos. Carvalho e Costa (2017), explicam que

[...] os aquíferos livres no Brasil têm sido cada vez mais utilizados, principalmente em áreas rurais e urbanas com pouca infraestrutura de abastecimento, o que os torna essenciais para a segurança hídrica de muitas comunidades.

Além disso, a recarga desses aquíferos depende de processos hidrológicos como a infiltração da água da chuva e a interação com os sistemas de drenagem.

Além da sua importância para o abastecimento de água, os aquíferos livres também têm um papel

relevante no equilíbrio ecológico. Eles contribuem para a manutenção da vegetação local e dos ecossistemas aquáticos, uma vez que a disponibilidade de água subterrânea está diretamente relacionada à umidade do solo e à perenidade de nascentes e rios. Estudos realizados por Almeida, Santos e Lima (2018) demonstram que, em regiões de recarga, a degradação dos aquíferos livres pode afetar a biodiversidade local e reduzir a disponibilidade de água para os ecossistemas. Em áreas como o Semiárido, a gestão sustentável dos aquíferos livres é crucial para prevenir o esgotamento das fontes de água e garantir a variedade de fontes de fornecimento de água. Dessa forma, o monitoramento desses aquíferos é fundamental não só para o abastecimento, mas também para a manutenção dos serviços ecossistêmicos e da segurança.

Sabe-se que a evapotranspiração é um dos principais processos que regulam os níveis de água subterrânea, influenciando diretamente a profundidade do aquífero livre, especialmente em regiões com variações sazonais de precipitação.

Durante períodos de alta evapotranspiração, como no verão, a demanda por água na superfície aumenta, resultando em uma diminuição da umidade do solo e uma elevação da profundidade do aquífero livre. Segundo Kumar, Thomas e Singh (2020), em regiões semiáridas, onde a evapotranspiração pode superar a recarga de aquíferos, a

[...] interferência da evapotranspiração no nível de água subterrânea pode ser observada principalmente durante períodos de seca prolongada, quando a extração de água para a atmosfera reduz a quantidade de água disponível para recarga.

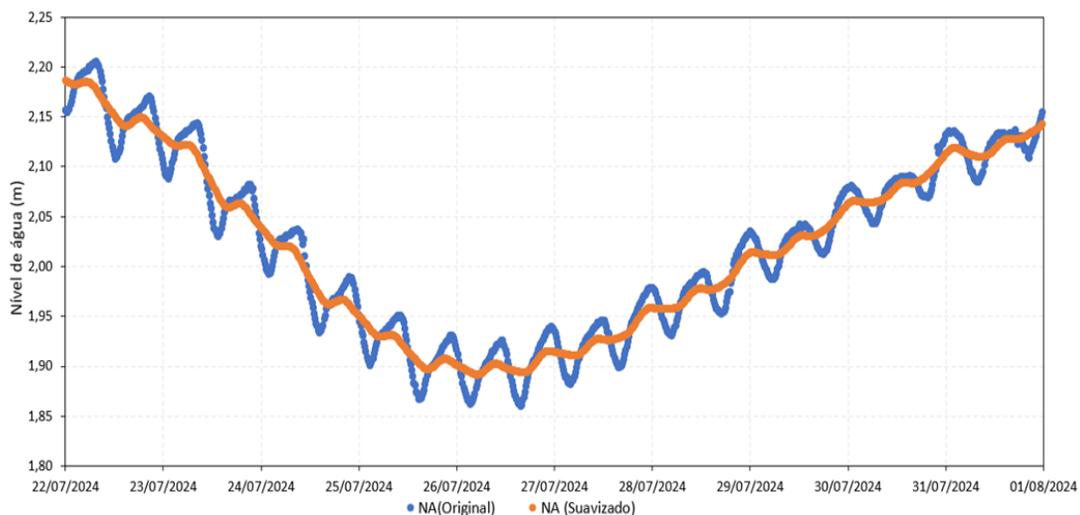
Costa e Magalhães (2020) destacam que durante os períodos de alta evapotranspiração, principalmente em regiões semiáridas, a água disponível no solo é consumida rapidamente pelas plantas e pela evaporação, o que leva a um aprofundamento do nível freático e à redução da recarga de água subterrânea. Esse efeito é

particularmente evidente em áreas onde a demanda por água é alta e o processo de evapotranspiração pode reduzir ainda mais a disponibilidade hídrica no subsolo. A evapotranspiração pode exercer influência sobre os níveis de água subterrânea, especialmente em regiões onde o balanceamento entre a precipitação e a evaporação é crítico para a manutenção do aquífero livre. Em clima seco, a evapotranspiração pode reduzir a água disponível para a recarga de aquíferos, afetando a profundidade do nível de água subterrânea.

A evapotranspiração também é um fator determinante na dinâmica dos níveis de água subterrânea, pois afeta diretamente o balanço hídrico entre a recarga e a perda de água para a atmosfera. Almeida e Costa (2017) afirmam que

[...] a evapotranspiração intensiva, especialmente em solos irrigados, pode superar a recarga natural, provocando uma diminuição da profundidade do nível freático e comprometendo a disponibilidade de água subterrânea.

Figura 3 - Comparação dos registros de nível de água com e sem aplicação do filtro digital



Fonte: autores, 2024.

Em alguns estudos sobre a dinâmica da evapotranspiração e os níveis de água subterrânea, observa-se que, em determinadas condições, não há uma relação direta entre a evapotranspiração e as flutuações em níveis de água subterrânea profundos. Isso ocorre em áreas onde o aquífero livre é mais profundo e menos sensível à evapotranspiração superficial. Silva e Almeida

(2018) apontam que

[...] em locais com aquíferos profundos, onde as camadas de solo que contêm água subterrânea estão distantes da superfície, a evapotranspiração pode não causar interferência significativa nos níveis de água, uma vez que o processo está mais restrito à zona superficial do solo.

Essa falta de correlação sugere que, em alguns

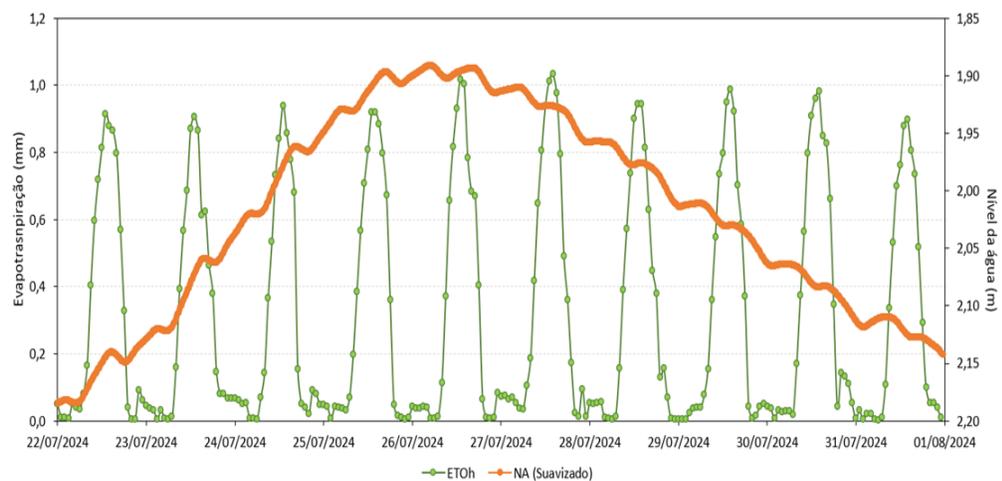
contextos na hidrologia, a profundidade do aquífero livre pode isolar o impacto da evapotranspiração das variações nos níveis de água subterrânea. De acordo com Figueiredo e Lima (2019), em áreas com aquíferos profundos ou confinados, a evapotranspiração não apresenta uma correlação significativa com as flutuações do nível de água subterrânea, uma vez que a água disponível nessas profundidades é menos suscetível às variações climáticas superficiais. Isso pode ser explicado pela estratificação geológica, onde camadas mais profundas de água não respondem diretamente às mudanças na umidade do solo e na evaporação da superfície.

Sabendo-se que a evapotranspiração é o processo de retorno que a água sofre para voltar para a atmosfera, foi feita a comparação em gráfico da evapotranspiração com o nível de água do PM-06. Na Figura 4 é possível observar que no período do dia que mais evapotranspirou, na maioria dos dias, houve a diminuição no nível da água

consecutivamente. Em situação onde o nível de água é elevado, apesar alta evapotranspiração, entende-se que pode haver a associação de um outro fator que pode interferir, como o próprio interfluxo ou um de maré onde o filtro possa ter falhado, não sendo possível identificar apenas por esta comparação em gráfico.

Martins (2023) pesquisou como variações de pressão atmosférica afetam as medições de evapotranspiração e o comportamento da água subterrânea. E constatou que é importante considerar que nem todas as variações no nível de água subterrânea são causadas pela evapotranspiração, pois fatores como mudanças na pressão atmosférica e as características específicas do aquífero também influenciam o nível de água, podendo causar flutuações que não estão relacionadas à evapotranspiração. Ao compensar essas variações, o estudo permite uma análise mais precisa do comportamento da água subterrânea e facilita a estimativa correta da recarga do aquífero.

Figura 4 - Comparação da evapotranspiração com registros filtrados do PM-06



Fonte: autores, 2024.

O gráfico apresenta a variação da evapotranspiração de referência horária e do nível de água suavizado no poço PM-06, no período de 22 de julho a 1 de agosto de 2024. Observa-se que a evapotranspiração apresenta flutuações diárias, refletindo o padrão esperado de maior perda de água para a atmosfera durante o período de maior radiação solar. No entanto, o nível de água suavizado, que foi ajustado para remover os efeitos das marés, não apresenta uma correlação clara com

a evapotranspiração. Isso sugere que outros fatores, como a influência de corpos d'água superficiais (e.g., córrego Sapucajuba) ou a interação com marés, podem estar exercendo um controle mais significativo sobre as flutuações do nível freático do que a evapotranspiração. A ausência de uma relação evidente entre ETo e NA reforça a necessidade de considerar múltiplos processos hidrológicos e ambientais em estudos futuros para compreender a dinâmica de aquíferos rasos em

regiões costeiras e sujeitas a influências de marés.

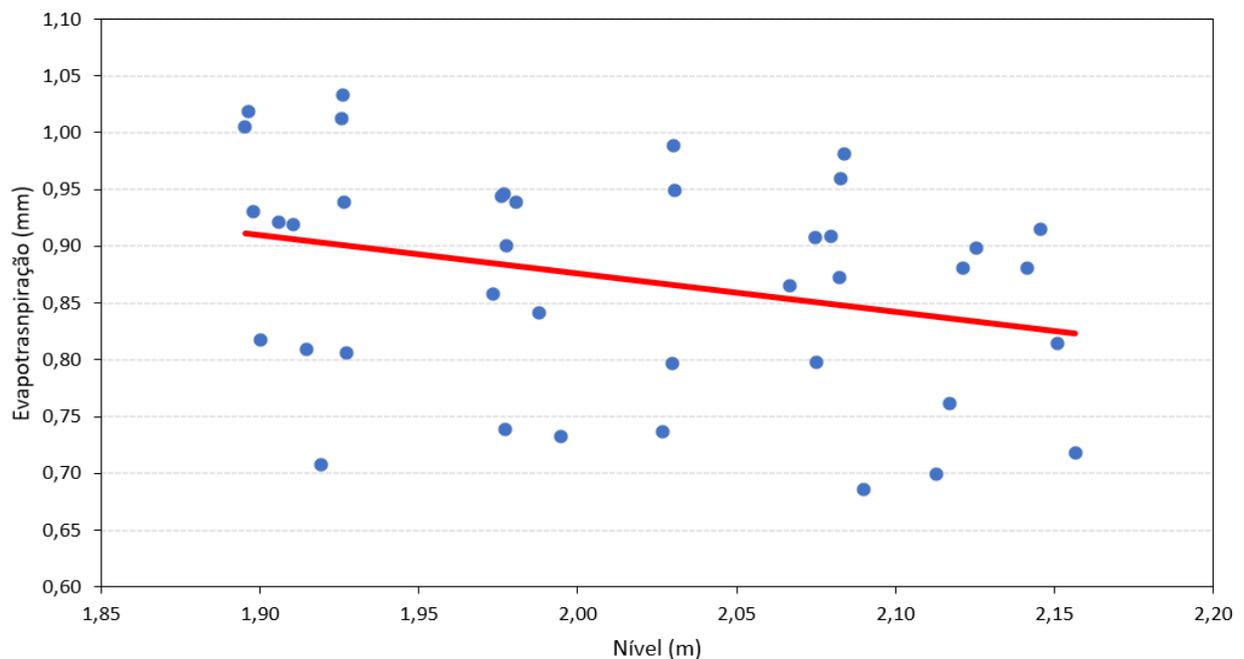
Na aplicação da equação de Pearson, foram considerados apenas os dados do intervalo de maior índice de evapotranspiração dentro do período estudado. Durante esse período, o coeficiente de Pearson obtido foi de $-0,31$, indicando uma correlação negativa fraca entre a evapotranspiração e o nível de água no poço. Esse valor exibe que, excepcionalmente nesse período, existe uma relação inversa das variáveis e que a influência da evapotranspiração sobre o nível do aquífero é moderada nesse intervalo específico, podendo ter influência de outros fatores que afetam ao longo do dia.

Para uma análise mais detalhada, a avaliação foi focada no horário de maior evapotranspiração, momento em que o nível do aquífero está mais suscetível a variação. Observou-se uma correlação

negativa mais acentuada, com o coeficiente de Pearson igual a $-0,66$. Esse valor sugere que, conforme a evapotranspiração aumenta, há uma tendência significativa de redução no nível do aquífero, reforçando a influência desse processo no balanço hídrico local.

Na Figura 5 foi criado um gráfico com dados dos horários onde houve maior evapotranspiração (12 h às 15 h). A linha de tendência evidencia essa correlação negativa e pode-se observar a relação entre o nível de água (metros) e a evapotranspiração (milímetros), com uma linha de tendência indicando a correlação entre as duas variáveis. Observa-se uma leve tendência de queda na linha de tendência, o que indica uma correlação negativa entre o nível de água e a evapotranspiração. Isso indica que, conforme o nível de água aumenta, a taxa de evapotranspiração tende a diminuir, ou vice-versa.

Figura 5 - Comportamento da Correlação dos dados de evapotranspiração e nível de água



Fonte: autores, 2024

Boumis et al. (2022) utiliza o método de flutuação do nível da água para avaliar como diferentes taxas de evapotranspiração afetam a variação do aquífero livre. No estudo, os autores identificam que há uma taxa de variação significativamente mais rápida no verão em comparação com o inverno, resultado da maior

evapotranspiração nas estações quentes. A pesquisa emprega um modelo de recessão cumulativa (MRC), demonstrando também que os níveis de água subterrânea sofrem variações sazonais. A menor evapotranspiração ocorre no inverno e permite uma recessão mais lenta e uma maior conservação da água no aquífero, enquanto

no verão, o aumento das perdas evapotranspirativas acelera a descida do nível da água subterrânea.

Na pesquisa de Lautz (2020), é abordado que em condições de aquífero raso, a evapotranspiração exerce uma influência significativa sobre a perda de água do aquífero livre, especialmente em climas secos. Sua metodologia é baseada na análise das flutuações diárias do nível do aquífero livre, sendo uma proposta que permite uma avaliação precisa do consumo hídrico por evapotranspiração. Esse entendimento é essencial para a comparação do balanço hídrico em regiões com aquíferos livres próximos à superfície.

A dispersão dos pontos ao redor da linha de tendência mostra que essa relação não é muito forte, já que os pontos estão espalhados de maneira ampla. A variação na evapotranspiração está concentrada entre 0,7 mm e 1,1 mm, independentemente de mudanças no nível de água.

Essa análise sugere que, embora exista uma relação negativa entre o nível de água e a evapotranspiração, essa correlação é fraca e, possivelmente, outros fatores ambientais ou climáticos desempenham um papel mais significativo.

Um ponto importante que pode ter contribuído para a falta de correlação clara é o uso da evapotranspiração de referência em vez da evapotranspiração real. A evapotranspiração de referência representa a perda de água por evapotranspiração em uma superfície de grama bem irrigada, mas a evapotranspiração real pode variar significativamente dependendo das características da vegetação local, do tipo de solo e da disponibilidade de água no solo. Portanto, é possível que a ETo não tenha capturado adequadamente as perdas de água no aquífero, levando-se a uma subestimação ou superestimação dos efeitos da evapotranspiração sobre o nível freático.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa permitiu identificar que a evapotranspiração exerce pouca influência nos níveis de água subterrânea, quando comparada com outros processos no campus da Universidade Federal do Pará. A partir dos dados de monitoramento do poço selecionado foi possível observar que, embora a evapotranspiração apresente uma correlação negativa com o nível

freático, essa relação não é predominante. Outros fatores, como a influência de corpos d'água superficiais, as marés e chuvas, podem ter um impacto mais significativo nas flutuações do nível do aquífero livre. Essa análise contribui para o entendimento da dinâmica hídrica local, essencial para o gerenciamento sustentável dos recursos hídricos em áreas urbanas.

Os resultados destacam a importância de considerar não apenas a evapotranspiração, mas também outros fatores, como a interação entre águas superficiais e subterrâneas, em estudos futuros sobre a disponibilidade hídrica em aquíferos rasos. Além disso, o uso de transdutores de pressão com correção barométrica, somado ao acompanhamento das estações meteorológicas, são essenciais mesmo com séries históricas incompletas. O uso de técnicas de filtragem digital, como o filtro Lanczos-cosine, mostrou-se eficaz para isolar os efeitos das marés e permitir uma análise mais precisa das flutuações do nível freático. No entanto, a influência moderada da evapotranspiração sugere que seu papel no balanço hídrico local deve ser avaliado em conjunto com outras variáveis, como a precipitação, a infiltração e o interfluxo entre aquíferos.

Por fim, o monitoramento de longo prazo é essencial para subsidiar políticas de conservação e gerenciamento sustentável dos recursos hídricos, além de proporcionar uma melhor compreensão das variações sazonais. Em regiões como a Amazônia, onde a interação entre os componentes atmosféricos e subterrâneos é complexa e sensível a mudanças climáticas e ambientais, pesquisas integradas e contínuas são fundamentais para a preservação dos aquíferos e para o planejamento de ações que garantam a segurança hídrica. Os aquíferos rasos desempenham um papel importante no abastecimento humano, na conservação de ecossistemas e no uso agrícola, destacando a necessidade de estudos detalhados e monitoramento constante.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.; BURMAN, R.D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, n. 4, p. 650-662, 1989. Disponível em: <https://www.iaii.int/admin/site/sites/default/files/uploa>

ds/Allen_Operational_Estimates_Reference_ET_1989.pdf. Acesso em: 03 out. 2024

ALMEIDA, L. F.; COSTA, M. T. Impacto da evapotranspiração na profundidade do lençol freático em regiões semiáridas do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 10, n. 2, p. 115-130, 2017.

ALMEIDA, L. F.; SANTOS, R. P.; LIMA, A. S. A importância da recarga e da preservação dos aquíferos livres no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 11, n. 3, 102-115, 2018.

BOUMIS, G.; KUMAR, M.; NIMMO, J. R.; CLEMENT, T. P. Influence of shallow groundwater evapotranspiration on recharge estimation using the water table fluctuation method. *Water Resources Research*, 58, e2022WR032073, oct. 2022. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2022WR032073>. Acesso em: 03 out. 2024

CARDOSO, A. *Gestão Costeira Integrada*. Maré. 2007. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rgci/glossario/mare.html>. Acesso em: 8 nov. 2024.

CARNEIRO FILHO, A. *Atlas de pressões e ameaças às terras indígenas na Amazônia brasileira*. São Paulo: Instituto Socioambiental, 2009. 48p. Disponível em: <https://acervo.socioambiental.org/acervo/publicacoes-s-isa/atlas-de-pessoes-e-ameacas-terras-indigenas-na-amazonia-brasileira>. Acesso em: 04 out. 2024

CARVALHO, L. H.; COSTA, F. M. A importância dos aquíferos livres na segurança hídrica do semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 22, n. 4, p. 55-68, 2017.

COSTA, F. M.; MAGALHÃES, J. F. Evapotranspiration and groundwater recharge in semi-arid regions: Effects on water table depth. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, n. 2, p. 58-71, 2020.

DINIZ, J. A. O.; ARRAES, C. E da S.; FEITOSA, F. A. C. A rede integrada de monitoramento de águas

subterrâneas - RIMAS: efeitos de maré em um poço no aquífero Beberibe, João Pessoa - PB. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17. e ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 18. Bonito, MS, 2014. Disponível em: [/https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/1103/1/Evento_Diniz_Rede.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/1103/1/Evento_Diniz_Rede.pdf). Acesso em: 04 out. 2024

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, Technical note 24, pp.114, 1977. Disponível em: <https://www.fao.org/4/f2430e/f2430e.pdf>. Acesso em: 04 out. 2024

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID – UFPE, 2000. 391 p.

FIGUEIREDO, M. T.; LIMA, R. P. A interação entre evapotranspiração e lençóis freáticos profundos: A ausência de correlação em aquíferos confinados. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 3, p. 210-223, 2019.

ISRAELSEN, O. W.; HANSEN, V. E. *Princípios y aplicaciones del riego*. 2. ed. Barcelona, 1965, p.395.

JANSE, R. et al. Conducting correlation analysis: important limitations and pitfalls. *Clinical Kidney Journal*, [S. l.], v. 14, n. 10, p. 2332-2337, 3 may. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1093/ckj/sfab085>. Disponível em: <https://academic.oup.com/ckj/article/14/11/2332/6262634?login=false>. Acesso em: 04 out. 2024

KUMAR, S. J.; THOMAS, A. P.; SINGH, M. K. Evapotranspiration and groundwater recharge in semi-arid regions: Effects on water table depth. *Hydrological Processes*, v. 34, n. 6, p. 890-904, 2020.

LAUTZ, L. ERRATUM: Estimating groundwater evapotranspiration rates using diurnal water-table fluctuations in a semi-arid riparian zone. *Journal of Hydrology*, v. 588, p. 124042, 2020.

MARENGO, J. A.; BETTS, R. (coords.). *Riscos das mudanças climáticas no Brasil. Análise conjunta*

Brasil-Reino Unido sobre os impactos das mudanças climáticas e do desmatamento na Amazônia. CCST-INPE, São Paulo, Brasil, 2011. Disponível em: http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/02.19.13.05/doc/relatorio_port.pdf. Acesso em: 05 out 2024.

MARTINS, R. T. A. Impacto da Compensação Barométrica e Rendimento Específico nas Estimativas de Evapotranspiração da Água Subterrânea: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Ribeirão da Onça/SP. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Univerdidade de São Paulo, [S. I.], 2023. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.18.2023.tde-18042024-140805>. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/003192777>. Acesso em: 05 out. 2024.

MOHAN, S.; ARUMUGAM, N. Relative importance of meteorological variables in evapotranspiration: factor analysis approach. *Water Resources Management, India*, v.10, p.1-20, feb. 1996. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00698808>. Acesso em: 05 out. 2024.

NOBRE, C. A. et al. Características do Clima Amazônico: aspectos Principais. *American Geophysical Union, Washington*, p. 149-162, jan. 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/233922062_Characteristics_of_Amazonian_Climate_Main_Features_American_Geophysical_Union. Acesso em: 05 out. 2024.

OPPENHEIM, A. V.; WILLISKY, A. S. *Sinais e Sistemas*. 2. ed. Pearson, 2010.

SANTOS, A. L.; OLIVEIRA, F. J.; ALMEIDA, T. P. Fatores que influenciam a recarga de aquíferos livres em áreas de vegetação nativa no Semiárido Brasileiro. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 49, n. 3, p. 106-118, 2019.

REIS, A. C dos S. Utilização do super para avaliação dos impactos do uso e ocupação do solo na qualidade de águas: um estudo de caso para a Bacia do Rio Ipojuca. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Univerdidade Federal de Pernambuco, Caruaru,

2023. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/53406/4/Trabalho%20de%20Conclusão%20de%20Curso%20-%20Ana%20Carolina%20dos%20Santos%20Reis.pdf>. Acesso em: 16 out. 2024.

SANTOS, T. S. et al. Análise de Eventos Extremos na Região Amazônica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, [S. I.], v. 6, n. 4, p. 1356-1370, 5 ago. 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/233109/48888>. Acesso em: 05 out. 2024

SHIRAHATA, K. et al. Digital filters to eliminate or separate tidal components in groundwater observation time-series data. *Japan Agricultural Research Quarterly: JARQ*, v. 50, n. 3, p. 241-252, aug. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/305762404_Digital_Filters_to_Eliminate_or_Separate_Tidal_Components_in_Groundwater_Observation_Time-Series_Data. Acesso em: 04 out 2024.

SILVA, J. F.; ALMEIDA, M. R. A relação entre evapotranspiração e os níveis de água subterrânea em aquíferos profundos. *Revista Brasileira de Hidrologia*, v. 14, n. 3, p. 145-157, 2018.

STICKLER, C. M. et al. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 110, n. 23, p. 9601-9606, may. 2013. Disponível em: <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1215331110>. Acesso em: 03 out. 2024.

TODD, D. K. *Groundwater hydrology*. New York: Wiley, 535 p.1959. Disponível em: https://www.academia.edu/1374102/Groundwater_Hydrology_by_D_K_Todd. Acesso em: 16 out. 2024.

TRUCCOLO, E. C. et al. Tides and sea level variability decomposition in the Port of Santos Waterway. *Brazilian Journal of Oceanography*, 67, e19265. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1679-87592019026506707>. Acesso em: 06 out. 2024.

VIANA, V. N. Filtro digital para remoção do efeito de

marés no nível da água do aquífero livre no campus da UFPA. Orientador: Prof. Dr. Giovanni Chaves Penner. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso

(Bacharelado em Engenharia Sanitária e Ambiental)
- Universidade Federal do Pará, [S. I.], 2024.