

Estudo de Caso Acerca da Duração da Precipitação na Recarga de Aquífero Utilizando o Método de Variação do Nível d'água

Anna Luíza Medeiros Corrêa da Silva

Engenheira Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, annamluizaunb@gmail.com

Matheus Marques Martins

Engenheiro Civil, Mestre, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mmarquesmartins@hotmail.com

André Luís Brasil Cavalcante

Professor Associado, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, abrasil@unb.com.br

RESUMO: Foi aplicado o Método de Variação do Nível d'água em regime transiente para verificar como a duração da precipitação impacta na recarga de um aquífero não confinado. Como área de estudo, foi utilizada a Fazenda Água Limpa, localizada no Distrito Federal. O fluxo vertical de umidade no solo foi modelado pelo método de Cavalcante e Zornberg (2019), sendo a frente de molhagem determinada numericamente utilizando a equação de Cavalcante e Zornberg (2017). Utilizando a linguagem *Wolfram Mathematica*, foram elaborados gráficos para 05, 15, 30 e 60 minutos de duração de precipitação, os quais demonstraram o comportamento do teor de umidade volumétrica do solo, do coeficiente de armazenamento e do volume de recarga ao longo da profundidade, para um tempo pós-chuva fixado em 15 minutos. Constatou-se, assim, a influência direta que a duração da chuva exerce sobre estes parâmetros: quanto maior a duração, maior o volume de recarga, assim como mais profunda a frente de molhagem e maior a zona saturada após a chuva. A recarga do aquífero se inicia quando a frente de molhagem iguala ao lençol freático, sendo calculada uma duração de chuva de 86,3 minutos para que isso ocorra.

PALAVRAS-CHAVE: Recarga de aquífero, Aquífero não confinado, Duração da precipitação, Fluxo de umidade no solo, Infiltração.

ABSTRACT: This study applied the Water Level Variation Method under a transient regime to investigate how the duration of precipitation impacts the recharge of an unconfined aquifer. The study utilized Água Limpa Farm, located in the Federal District. The vertical moisture flux in the soil was modeled using the Cavalcante and Zornberg (2019) method, with the wetting front being determined numerically using the constitutive model developed by Cavalcante and Zornberg (2017). Graphs were plotted using the Wolfram Mathematica language for precipitation durations of 5, 15, 30, and 60 minutes, and the behavior of soil volumetric moisture content, storage coefficient, and recharge volume along the depth was observed at a fixed 15-minute post-rain period. Therefore, the direct influence of precipitation duration on these parameters was evident. The longer the duration, the greater the recharge volume, the deeper the wetting front, and the larger the saturated zone after the rain. The aquifer recharge occurs when the wetting front equals the water table, as a rainfall duration of 86.3 minutes was calculated for this occurrence.

KEYWORDS: Aquifer recharge, Unconfined aquifer, Precipitation duration, Soil moisture flux, Infiltration.

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas são extremamente importantes para a segurança hídrica, uma vez que 97% da água doce líquida do planeta se encontra na forma de aquíferos (Hirata *et al.*, 2019). Desse modo, acompanhar a flutuação da água subterrânea (recarga e descarga) em aquíferos livres é imprescindível para a gestão e o uso dos recursos hídricos de forma sustentável.

A variação do nível freático está diretamente relacionada ao regime de precipitações, à temperatura e ao padrão de uso do solo. A parcela da precipitação que infiltra no solo promove alterações no perfil de umidade

deste: ao longo do tempo, a água alcança uma camada impermeável e acumula-se preenchendo totalmente os poros do solo, constituindo a zona saturada, ficando limitada superiormente pela superfície freática – superfície imaginária em que a pressão é igual a atmosférica (Tomasella, 1992). É nesse processo que ocorre a recarga do aquífero. Dessa forma, a duração da chuva é indispensável para entender quando ocorre a recarga, já que está diretamente relacionada ao volume de água fornecido ao solo.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é aplicar o Método de Variação do Nível d'água em regime transiente, segundo a abordagem de Silva *et al.* (2023), para verificar como a duração da precipitação influencia a recarga de um aquífero não confinado. Análises paramétricas foram realizadas para demonstrar o padrão de comportamento do teor de umidade volumétrica do solo (i), do coeficiente de armazenamento (ii) e do volume de recarga (iii), ao longo da profundidade. Os parâmetros e características fisiográficas aplicados no modelo correspondem ao Poço PM4 da Bacia do Córrego Capetinga em Brasília, Distrito Federal. A determinação dos parâmetros (i), (ii) e (iii) foi feita a partir de um tempo padrão pós-precipitação de 15 minutos. Além disso, também foi objeto desse estudo a determinação do tempo de chuva necessário para o início da recarga, ou seja, o tempo para a frente de molhagem se igualar à profundidade do lençol freático.

2 ÁREA DE ESTUDO E DADOS DE ENTRADA

O poço analisado neste estudo, PM4, pertence à Bacia do Córrego do Capetinga, localizada dentro da Fazenda Água Limpa (FAL), área de estudo piloto da Universidade de Brasília (Figura 1).

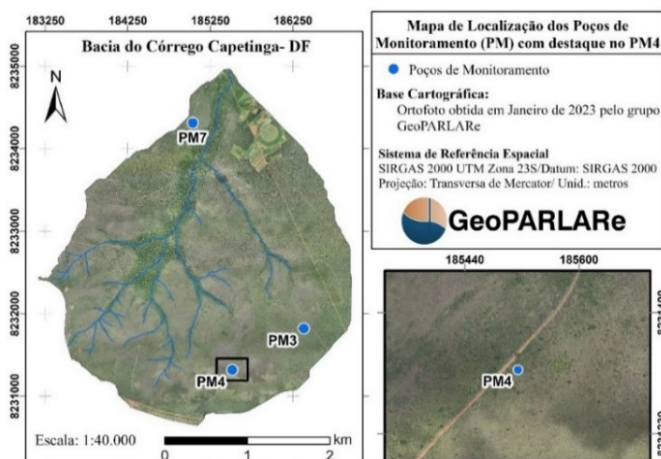


Figura 1. Mapa de Localização dos Poços de Monitoramento.

A partir de dados extraídos da plataforma ZENTRA, foram elaborados relatórios de ensaios laboratoriais de caracterização, cujas informações relevantes estão disponíveis na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1. Parâmetros do Solo em PM4.

Umidade inicial de campo (θ_i)	29,4%
Profundidade do lençol freático (l_z)	3,22 m
Coefficiente de permeabilidade (k_s)	2,42 mm/s
Granulometria	Pedregulho (3%), Areia Grossa (20%), Areia fina (68%), Silte (7%), Argila (3%)

A profundidade do lençol freático é calculada como a diferença entre a profundidade do piezômetro (4,2 metros) e o nível d'água registrado por esse. Para a análise, foi adotado o dia 07 de janeiro de 2024, quando foi registrado o menor nível d'água durante o período de monitoramento, como é possível observar na Figura 2. A umidade volumétrica inicial adotada, desse modo, é a registrada na mesma data e horário, conforme a Figura 3. O coeficiente de permeabilidade foi determinado em ensaio de campo com carga variável.

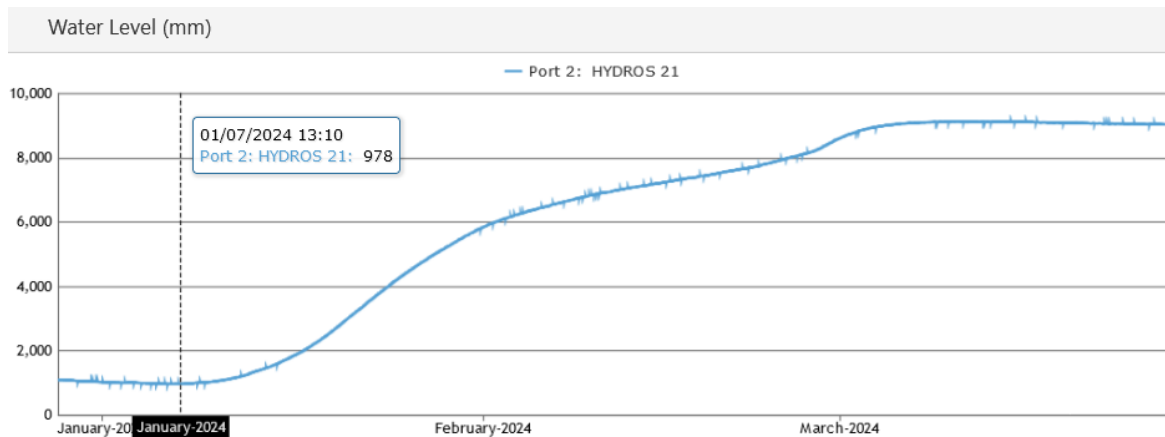


Figura 2. Nível da água registrada no piezômetro no Poço de observação PM4 (Fonte: Plataforma Zentra).

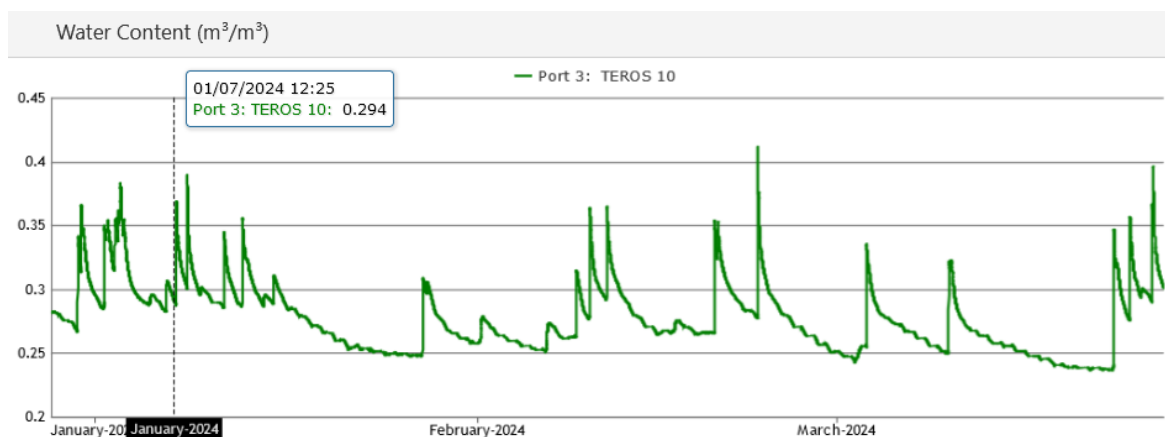


Figura 3. Umidade volumétrica ao longo do tempo no Poço de observação PM4 (Fonte: Plataforma Zentra).

3 METODOLOGIA

3.1 Método da Variação do Nível d'água Transiente

Aprimorado por Healey e Cook (2002), o Método da Variação do Nível d'Água (VNA) é um dos principais modelos utilizados para a estimativa de recarga dos aquíferos livres, não considerando o fluxo lateral. Para aplicá-lo, são necessários dados da variação dos níveis d'água e a estimativa do rendimento específico. A equação geral dessa formulação é baseada no equilíbrio hídrico. No entanto, ao se considerar curtos intervalos de tempo (horas ou dias), o tempo entre a recarga e a redistribuição da água para outros componentes do balanço hídrico é considerável (Pinto, 2010; *apud* Silva *et al.*, 2023). Dessa forma, toda a água que alcança a zona saturada será considerada como destinada à recarga do aquífero (armazenamento). Assim, a expressão de recarga pode ser expressa na forma da Equação (1):

$$R = S_y \cdot \frac{\partial h}{\partial t} = S_y \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Em que R é a taxa recarga (metros/segundo), Δh é a variação do nível d'água para um intervalo de tempo Δt , e S_y é o rendimento específico ou armazenamento específico (adimensional), definido por Fitts (2012, *apud* Silva *et al.*, 2023) pela Equação (2), em que η é a porosidade, e θ é o teor de umidade volumétrica saturado (adimensional).

$$S_y = \eta - \theta \quad (2)$$

A grande barreira do método VNA é a determinação do rendimento específico. No entanto, Silva *et al.* (2023) propuseram uma solução analítica com dependência no tempo para sua determinação, o que facilita o uso do método anteriormente citado.

3.2 Cálculo do Teor de Umidade Volumétrico $\theta(z, t)$

Para o cálculo do teor de umidade volumétrica ao longo do perfil do solo após a precipitação, será usada a equação do caso unidirecional da solução analítica proposta por Cavalcante e Zornberg (2019), que consiste em uma função do tempo t , em segundos, e da profundidade z , em metros. Esta está expressa na Equação (3):

$$\theta(z, t) = \theta_0 + (\theta_i - \theta_0) \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{\left[4\bar{D}_z e^{-\frac{\bar{a}_s b_z}{2\bar{D}_z}} \left(-2\pi\bar{D}_z n e^{\frac{\bar{a}_s b_z}{2\bar{D}_z}} + \bar{a}_s l_z \sin\left(\frac{\pi b_z n}{l_z}\right) + 2\pi\bar{D}_z n \cos\left(\frac{\pi b_z n}{l_z}\right) \right) \right]}{\bar{a}_s l_z^2 + 4\pi^2 \bar{D}_z^2 n^2} \right\} \times \left[n\pi \cos\left(\frac{n\pi}{l_z} b_z\right) + \frac{l_z \bar{a}_s n}{2\bar{D}_z} \sin\left(\frac{n\pi}{l_z} b_z\right) \right] \exp\left[-t \left(\frac{\bar{a}_s^2}{4\bar{D}_z} + \frac{D_z n^2 \pi^2}{l_z^2} \right)\right] \exp\left[\frac{\bar{a}_s b_z}{2\bar{D}_z}\right] \sin\left(\frac{n\pi}{l_z} z\right) \right\} \quad (3)$$

Em que $\theta(z, t)$ é o teor de umidade volumétrica unidirecional em função da profundidade e do tempo.

Para o cálculo da Equação (3), faz-se preciso o conhecimento de certos parâmetros do Poço PM4, como a profundidade do lençol freático (l_z) e o teor de umidade inicial do solo (θ_i), já determinados (Tabela 1), bem como a velocidade advectiva da umidade (a_s), a difusividade (D_z) o teor de umidade na superfície do solo no instante em que se encerra a precipitação (θ_0) e a frente de molhagem (b_z).

Para determinar a_s , D_z e θ_0 , faz-se necessário determinar a umidade residual (θ_r) e a umidade de saturação (θ_s), por meio do ajuste da curva de retenção de água no solo (SWRC – *Soil Water Retention Curve*). Neste trabalho, são usados os resultados obtidos do ajuste da curva feita com os dados de Lopera (2016), obtida por Silva *et al.* (2023), que usou o modelo constitutivo de Costa e Cavalcante (2021). O resumo dos parâmetros encontrados a partir desse ajuste estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Resumo dos Parâmetros obtidos do modelo calibrado (Fonte: Silva *et al.*, 2023).

Parâmetro hidráulico de ajuste – Macroporos (δ_1)	0,00004
Parâmetro hidráulico de ajuste – Microporos (δ_2)	0,01269
Fator de ponderação correspondente à região dos macroporos (λ)	0,38159
Umidades residual (θ_r)	0,001
Umidade de saturação (θ_s)	0,559
Parcela advectiva da umidade (a_s)	0,00004
Parcela de difusividade da umidade (D_z)	0,00035
Umidade volumétrica na superfície do solo (θ_0)	0,56

3.3 Determinação da Frente de Molhagem (b_z) para as Diferentes Durações de Precipitação

Para determinar a frente de molhagem (b_z), deve-se calcular a profundidade (z) para a qual a umidade se iguala à umidade inicial (θ_i) antes da precipitação, para uma determinada duração de chuva (t_p). Para isso, é necessário considerar a solução analítica para a equação de Richards proposta por Cavalcante e Zornberg (2017), onde $Erfc(Z)$ é a função erro complementar:

$$\theta(z, t_p) = \theta_i + (\theta_0 - \theta_i)A(z, t_p) \quad (8)$$

Em que

$$A(z, t) = \frac{1}{2} \left[Erfc(Z_{-1}) + \exp\left(\frac{\bar{a}_s z}{\bar{D}_z}\right) Erfc(Z_{+1}) \right], \quad Z_{\pm 1} = \frac{z \pm \bar{a}_s t_p}{2\sqrt{\bar{D}_z t_p}} \quad (9)$$

Desse modo, a frente de molhagem é determinada estimando o valor de z que resolve a equação abaixo, considerando uma precipitação de duração t_p .

$$\theta(b_z, t_p) = \theta_i + (\theta_0 - \theta_i)A(b_z, t_p) = \theta_i \quad (10)$$

A Equação (10) foi resolvida utilizando o comando *NSolve* no programa *Wolfram Mathematica 11.3*, determinando o tempo de chuva no qual a frente de molhagem se iguala à profundidade do lençol freático. Essa equação, em seguida, foi resolvida numericamente quatro vezes para os seguintes valores de t_p : 05, 15, 30 e 60 minutos. As frentes de molhagem determinadas foram, respectivamente, $b_{z5} = 0,79$ m, $b_{z15} = 1,36$ m, $b_{z30} = 1,92$ m e $b_{z60} = 2,70$ m. Determinadas essas frentes de molhagem, é possível resolver a Equação (3) para as quatro frentes de molhagens. Dessa forma, calcula-se o rendimento específico para cada caso, conforme a Equação (11) proposta por Silva *et al.* (2023):

$$S_y(z, t) = \eta - \theta(z, t) \quad (11)$$

3.3 Cálculo de volume de recarga (V_w)

Com o rendimento específico S_y determinado para um certo tempo t após a precipitação, o qual foi fixado em 15 minutos, é possível calcular o volume de recarga do aquífero por meio da Equação (12), em que V_w é o volume de recarga (em m^3) e A é a área do aquífero (em m^2), sujeita à mudança de coluna do nível d'água dh (em metros), que se deve ter registro no poço de observação:

$$V_w = -A \cdot dh \cdot S_y \quad (12)$$

4. RESULTADOS

4.1 Cálculo da Umidade e da Frente de Molhagem para Cada Duração de Precipitação

Para cada uma das quatro frentes de molhagem b_z , foram plotadas as funções da umidade volumétrica ao longo da profundidade (z) nos instantes t pós-precipitação de 0 e 15 minutos. Na análise comparativa dos perfis, é possível observar como a distribuição da umidade se propaga para níveis mais profundos do solo em 15 minutos após o fim da precipitação. Para chuvas com menores durações e, conseqüentemente, menores frentes de molhagem, a umidade de saturação alcança menores profundidades.

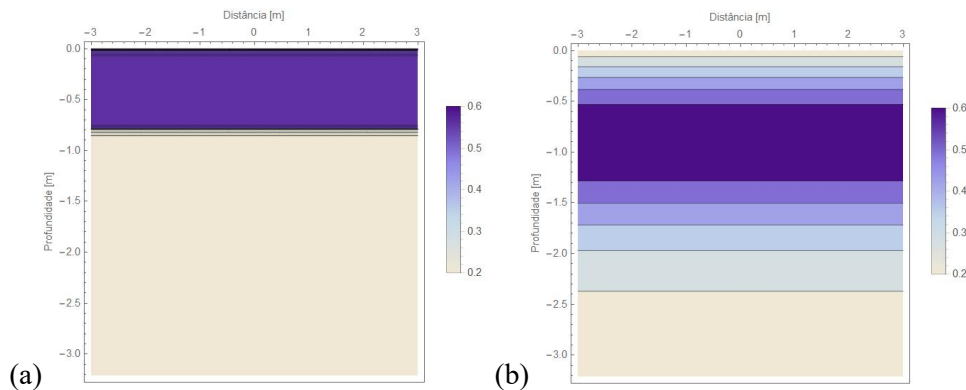


Figura 4. Perfil de umidade em $t = 0$ minutos (a) e em $t = 15$ minutos (b) para a frente de molhagem b_{z5} .

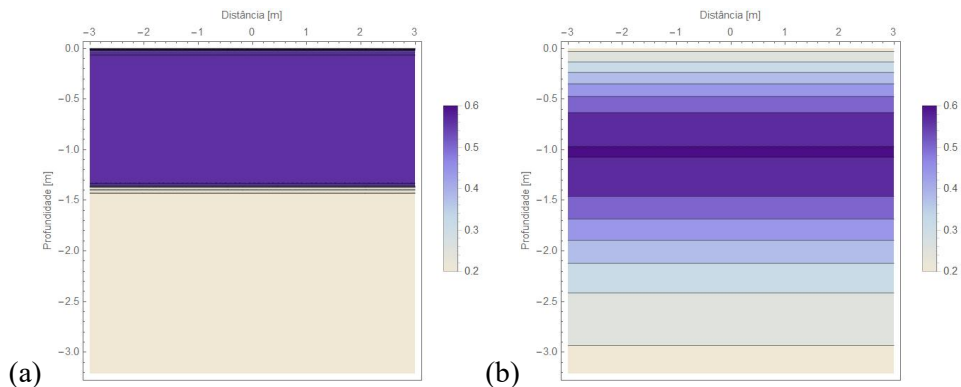


Figura 5. Perfil de umidade em $t = 0$ minutos (a) e em $t = 15$ minutos (b) para a frente de molhagem b_{z15} .

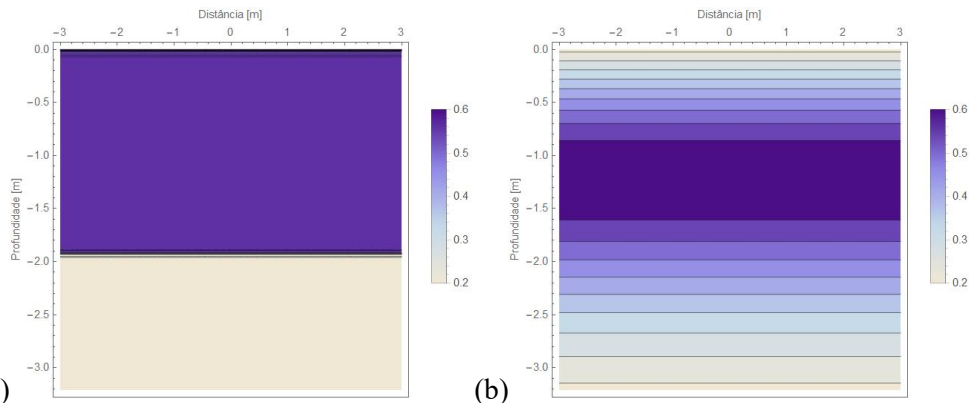


Figura 6. Perfil de umidade em $t = 0$ minutos (a) e em $t = 15$ minutos (b) para a frente de molhagem b_{z30} .

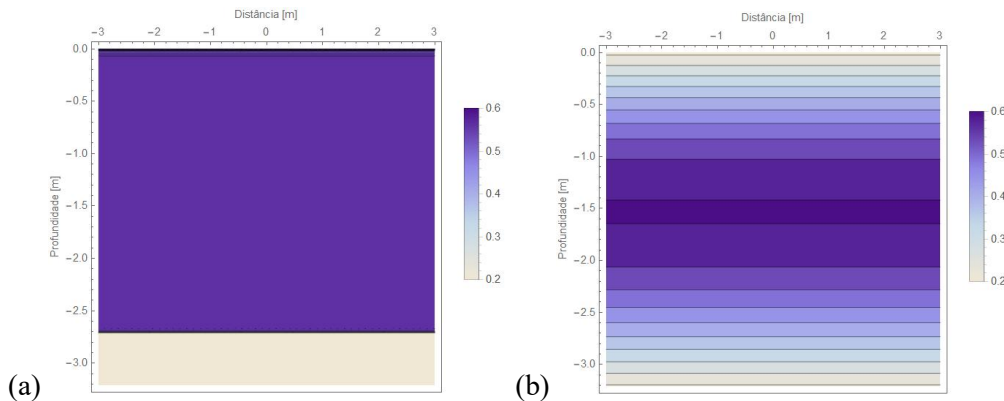


Figura 7. Perfil de umidade em $t = 0$ minutos (a) e em $t = 15$ minutos (b) para a frente de molhagem b_{z60} .

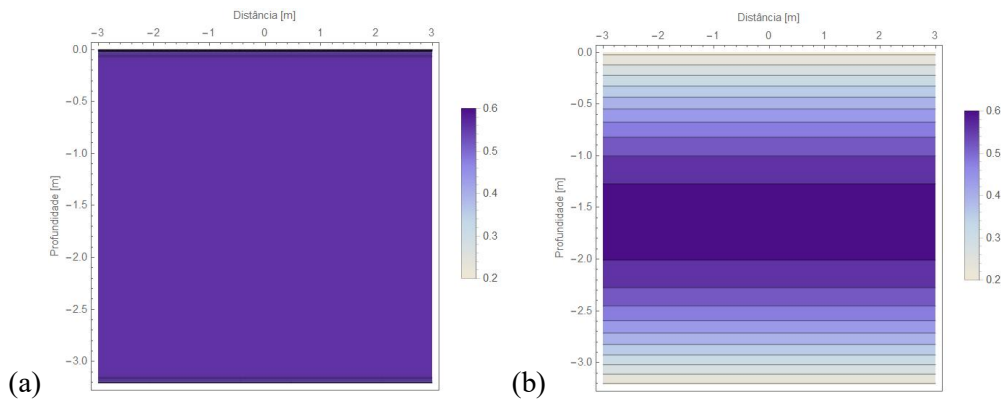


Figura 8. Perfil de umidade em $t = 0$ minutos (a) e em $t = 15$ minutos (b) para a frente de molhagem igual ao lençol freático l_z .

Ao longo de todo o perfil do solo até essas profundidades, o teor de umidade volumétrica é uniforme e corresponde ao teor de saturação ($\theta_s = \theta_0$). Transcorridos 15 minutos após a precipitação, é possível observar como as faixas de teor de umidade são menores e mais divididas perto da superfície para as chuvas mais breves, ao passo que, para chuvas mais longas, a distribuição dessas faixas é mais uniforme acima da frente de molhagem – que avança – e abaixo dela.

Na Figura 8(a), é possível observar como todo o perfil do solo acima do lençol freático ($l_z = 3,22$ m) está saturado. Para durações de chuvas maiores que 86,3 minutos, pode-se constatar a recarga do aquífero, já que esse é o tempo necessário para que a frente de molhagem seja equivalente ao nível freático. Por fim, na Figura 8(b), percebe-se como a umidade se desloca no perfil do solo: as camadas mais próximas à superfície diminuem o teor de umidade devido ao movimento descendente da água, enquanto que, nas camadas inferiores, a distribuição de umidade se estratifica, diminuindo seu teor ao longo da profundidade.

4.2 Análises paramétricas: Teor de Umidade, Rendimento Específico e Volume de Recarga para Diferentes Durações de Chuva

Foram plotados os gráficos do teor de umidade e do rendimento específico pela profundidade para 15 minutos após a precipitação, para as durações de chuva t_p : 05 minutos, 15 minutos, 30 minutos e 60 minutos.

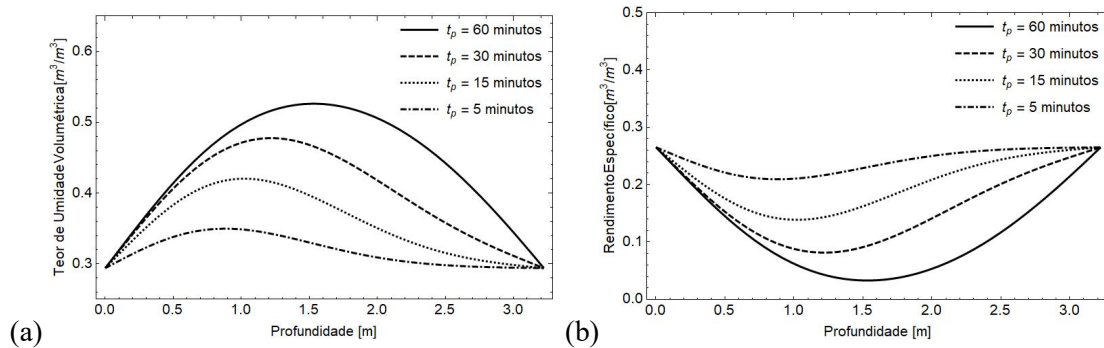


Figura 9. Comportamento do (a) teor de umidade e do (b) rendimento específico para diferentes t_p .

Na Figura 9(a), é perceptível que, para chuvas mais longas, o teor de umidade volumétrica se mantém mais próximo do teor de saturação e mais distante da superfície; além disso, o pico de umidade é mais alargado, ou seja, abrange um trecho de maior espessura. Já para chuva mais curtas, o teor máximo de umidade é cada vez menor e se encontra mais próximo da superfície; ademais, o pico é menos alargado, traduzindo uma menor espessura do maior teor de umidade. Na Figura 9 (b), é notório o comportamento inverso do rendimento específico em relação ao teor de umidade, já que, no caso de chuvas longas, as porcentagens de vazios são menores nas profundidades em que a umidade é maior, enquanto é maior e mais próxima à superfície no caso de precipitações mais curtas. Isso é comprovado também por meio da Equação (12).

Além disso, determinados os coeficientes de armazenamentos (ou rendimento específico), é possível calcular o volume de recarga. Assim, para as mesmas diferentes durações de precipitação t_p , foram obtidas as relações entre o volume de recarga e a profundidade do solo, adotando um declínio da coluna hidrostática dh de 0,5 metro da coluna d'água e uma área A de 1 hectare, para um t pós-chuva de 15 minutos.

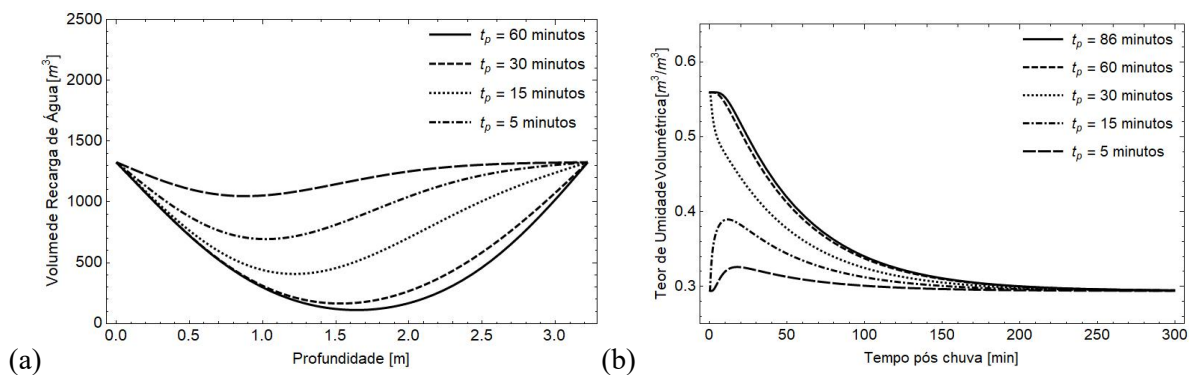


Figura 10. (a) Volume de recarga para diferentes t_p ; (b) Umidade para diferentes t_p para $z = 1,6$ metros.

Na Figura 10, fica evidente a proporção entre o volume de recarga e o rendimento específico, o que se traduz analiticamente na Equação (13). As curvas de volume de recarga por profundidade são as curvas de rendimento específico amplificadas pela multiplicação da área e do declínio da coluna d'água. Na Figura 11, foi fixada uma profundidade de 1,6 metro a fim de compreender, a longo prazo, como a umidade se dispersa. A tendência, independente da duração da chuva, é que todo o perfil acima do lençol freático assumira um valor constante de teor de umidade, próximo ao inicial, sendo uma limitação que decorre das condições de contorno do modelo. As chuvas com duração de 5 minutos e 15 minutos possuem umidade inicial no tempo $t = 0$, uma vez que as frentes de molhagem dessas chuvas são menores que a profundidade de análise adotada.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cálculo da recarga de aquíferos livres é comumente realizado pelo método VNA, que é calculado utilizando o armazenamento específico (S_y). Esse, por sua vez, pode ser determinado de forma transiente, onde S_y é uma função do teor de umidade volumétrica na solução de Cavalcante e Zornberg (2019). Nesse equacionamento, é necessário calcular a frente de molhagem, que depende da duração da chuva (t_p). Dessa forma, buscou-se demonstrar, por meio de análises paramétricas, a relação da duração da precipitação com a recarga. Nesse sentido, elegeu-se quatro tempos de precipitação para análise, a saber: 05, 15, 30 e 60 minutos.

Por meio dos gráficos elaborados, foi possível estabelecer e ratificar a influência ao longo do perfil do solo de tais durações no comportamento do teor de umidade volumétrica e, por consequência, do rendimento específico e do volume de recarga. Constatou-se que, para a maior duração da chuva, maior é o volume de água fornecido e mais profunda é a frente de molhagem. Ainda foi verificado que, para que a recarga do aquífero ocorra, a duração das precipitações deve ser superior ao tempo que a frente de molhagem alcança o lençol freático. Nesse estudo de caso, esse tempo correspondeu a 86,3 minutos. Para esse tempo, o rendimento específico é nulo, uma vez que o ponto infinitesimalmente acima do lençol freático também possui o teor de umidade igual ao teor de saturação.

Além disso, foi verificado que, próximo à condição de contorno (lençol freático) e na superfície, o modelo não se aplica fidedignamente devido à limitação do modelo de Cavalcante e Zornberg (2019), já que imediatamente após a chuva, as umidades retornam à umidade inicial nessas regiões. Além disso, observou-se também que, para extrapolações temporais pós-precipitação, a umidade ao longo de todo o perfil tende a estabilizar-se num único valor de umidade antes mesmo da zona de maior saturação atingir a profundidade do lençol freático. Ou seja, caso a frente de molhagem não seja igual ao lençol freático, não há recarga.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 306975/2023-8) e pela Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF Projeto 00193-00001609/2023-44).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cavalcante, A.L.B., Zornberg, J.G. (2017). Efficient approach to solving transient unsaturated flow problems. I: Analytical solutions. *International Journal of Geomechanics*, 17(7), 04017013.
- Costa, M. B. A. da Costa, & Cavalcante, A. L. Brasil. (2021). *Bimodal soil-water retention curve and k-function model using linear superposition*. *International Journal of Geomechanics*, 21(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0002083](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002083)
- Healy, R.W., Cook, P.G. (2002). Using groundwater levels to estimate recharge. *Hydrogeology Journal* 10, 91–109
- Fitts, C. (2012). *Águas Subterrâneas* (2ª ed.). Bookman.
- Lopera, J.F.B. (2016). Influência da microestrutura no comportamento mecânico dos solos tropicais naturais e compactados.
- Silva, A.L.M.C., Martins, M.M., Cavalcante, A.L.B. (2023). *Determinação do Rendimento Específico de Solos da Bacia do Córrego Capetinga – DF para o Cálculo de Recarga pelo Método de Variação do Nível d'água*.
- Tomasella, J.V. (1992). *Determinação da recarga natural de aquíferos através de um modelo de fluxo na zona não-saturada*.