

Determinação e análise das características hidrodinâmicas de um solo no agreste pernambucano utilizando a Metodologia Beerkan

Iálysso da Silva Medeiros^{1,*}, José Thiago Gomes da Silva¹, José Floro de Arruda Neto¹, Gustavo José de Araújo Aguiar¹, Emerson Leandro da Silva² e Gilson Lima da Silva¹

¹Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. *Campus* Caruaru. Av. Marielle Franco, S/Nº, km 59. Nova Caruaru. Caruaru-PE, Brasil (CEP 55014-900). *E-mail: ialysson.medeiros@ufpe.br.

²Universidade Federal de Pernambuco. Núcleo de Tecnologia. *Campus* Caruaru. Av. Marielle Franco, S/Nº, km 59. Nova Caruaru, Caruaru-PE, Brasil (CEP 55014-900).

Resumo. O estudo do solo sempre tem grande importância nas diversas esferas da engenharia, sendo a hidrodinâmica uma delas, em especial em regiões onde a literatura apresenta déficit em parâmetros para consulta. Nesse contexto, esse trabalho analisa as características do solo de uma mata nativa no agreste do Estado de Pernambuco, através da Metodologia Beerkan, que utiliza a granulometria do solo e um infiltrômetro em anel para a obtenção dos parâmetros relativos à retenção, condutividade hidráulica, e a retenção de água. Os parâmetros de Beerkan, foram obtidos por meio do algoritmo BEST Slope. Como resultado observou-se que o solo avaliado apresenta como características principais pequena capacidade de retenção, grande crescimento da condutividade hidráulica para teores de umidade mais baixos e estabilização da condutividade conforme o solo atinge o estado de saturação, sendo valores visualizados em trabalhos da literatura. Também foi possível constatar que o método de Beerkan é apropriado para modelar a infiltração, sendo possível utilizar em diferentes solos.

Palavras-chave: Ensaio de infiltração; Curva de retenção de água no solo; Condutividade hidráulica.

Abstract. *Determination and analysis of the hydrodynamic characteristics of a soil in the Agreste Region of Pernambuco using the Beerkan Methodology.* The study of the soil has always had great importance in the various spheres of engineering, hydrodynamics being one of them. In this context, this work analyzes the soil characteristics of a native forest in the wild of the State of Pernambuco, Brazil, through the Beerkan

Recebido
08/05/2022

Aceito
20/08/2022

Publicado
31/08/2022



Acesso aberto







ORCID

0000-0001-7112-5984
Iálysso da Silva
Medeiros

0000-0003-3155-9029
José Thiago Gomes da
Silva

Methodology, which uses the soil granulometry and a ring infiltrometer to obtain the parameters related to retention, hydraulic conductivity, and the water retention. Beerkan parameters were obtained through the BEST Slope algorithm. The results showed that the evaluated soil presents as main characteristics small water retention capacity, a large increase in hydraulic conductivity for lower soil water contents and stabilization of the conductivity with the soil reaching the saturation state, being consistent with those observed in the literature. It appears then that the Beerkan method is appropriate to model the infiltration, being possible to use in different soils.

Keywords: Infiltration test; Soil water retention curve; Hydraulic conductivity.

-  0000-0002-7586-2997
José Floro de Arruda Neto
-  0000-0002-4727-2981
Gustavo José de Araújo Aguiar
-  0000-0001-5465-3179
Emerson Leandro da Silva
-  0000-0003-2484-3590
Gilson Lima da Silva

Introdução

Nos últimos anos a população urbana vem crescendo de forma exponencial e, consequentemente, vem ocorrendo constantes alterações no uso do solo (Guo, 2013; Lima, 2018). Essas alterações impactam o ambiente das bacias hidrográficas, devido à alteração nos processos hidrológicos, como infiltração e escoamento superficial, gerando situações de alagamentos e inundações (Niehoff et al., 2002).

Na engenharia torna-se indiscutível o conhecimento das características do solo de uma região, visto que diversos campos de estudos como a geotecnia, a mecânica dos solos, projetos de fundações, de barragens, estudos do setor agrícola, entre outros dependem inicialmente de informações precisas sobre o solo. As características hidrodinâmicas, como retenção e condutividade hidráulica, destacam-se pela sua importância na modelagem do transporte de água e sedimentos (Santos, 2012; Mascarenhas, 2018).

Para a determinação dos valores verdadeiros de certa característica do solo em um estudo de campo, é necessária a obtenção de um número de dados bastante elevado. No caso da caracterização hidrodinâmica do solo, esta necessita de análises realizadas em campo e laboratório bastante custosas e que exigem um tempo extenso de estudo. Dessa forma, pesquisadores começaram a utilizar métodos indiretos que se baseiam em dados do solo prontamente disponíveis, usuais e de baixo custo (Minasny et al., 1999; Wagner et al., 2001; Minasny e MacBratney, 2002).

A principal metodologia empregada para determinar características hidrodinâmicas do solo é a metodologia Beerkan idealizada por Haverkamp et al. (1994). A metodologia baseada em ensaios simples, permite através de testes de infiltração, distribuição granulométrica e saturação do solo determinar as propriedades hidrodinâmicas do solo (França Neto et al., 2021).

Di Prima et al. (2016) afirmam que diversos autores utilizam métodos indiretos, como a metodologia Beerkan, que recomenda a estimativa de tais parâmetros de obtenção mais fácil, mais ágil e menos onerosa. Bagarello e Lovino (2012) confirmaram que a metodologia BEST é confiável para a maioria dos solos em relação a caracterização simples do solo.

Bouarafa et al. (2019) analisaram três algoritmos da metodologia BEST: BEST-Slope, BEST-Intercept, e BEST-Steady para verificar os dados de infiltração. Os algoritmos foram aplicados a quatro estruturas de infiltração de solo comum na zona urbana de Lyon, na França. Os resultados apontaram que há ineficiência de infiltração em algumas dessas estruturas. Além disso, o estudo confirmou o impacto de certas condições físicas, como a

modificação da estrutura dos poros devido a colonização de vegetação invasiva e a presença de matéria orgânica, na degradação do comportamento hidrodinâmico do solo.

Para a região em estudo, é visível a carência de parâmetros característicos para os diversos solos, causando grandes dificuldades para aqueles que necessitam de dados confiáveis para execução de obras de engenharia e pesquisas científicas.

Dentre os trabalhos que utilizaram a metodologia Beerkan para caracterização do solo no semiárido nordestino, podemos mencionar os estudos de Souza et al. (2008), Soares et al. (2020) e França Neto et al. (2021).

Souza et al. (2008) utilizou a metodologia em duas localidades do semiárido no estado da Paraíba, encontrando valores aceitáveis para os parâmetros e ajuste preciso para as infiltrações acumuladas, confirmando a robustez do método.

Soares et al. (2020) observaram que uma região de Caatinga no Município de São Bento do Una, Pernambuco, apresenta valores baixos de condutividade hidráulica saturada e uma infiltrabilidade que favorece o escoamento superficial, com o solo natural, e alteração das propriedades físicas como diminuição da densidade e aumento da porosidade, com o solo antropizado.

França Neto et al. (2021) analisaram as propriedades hidrodinâmicas do solo através de 48 pontos em 758 m² de mata nativa da Caatinga. Os autores aplicaram o Método Beerkan através do algoritmo BEST constatando que a estrutura do solo foi importante nos processos de infiltração de água.

Devido aos fatores relacionados acima, este trabalho objetiva-se em avaliar as características hidrodinâmicas do solo de uma cidade do agreste de Pernambuco através do método de Beerkan com o algoritmo BEST-Slope, analisando características físicas do solo, as curvas de retenção de água $\theta(h)$ e condutividade hidráulica $K(\theta)$.

Metodologia

Área de estudo

As medidas de infiltração desta pesquisa foram realizadas nas proximidades do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE-CAA), situada no Município de Caruaru-PE na coordenada 35° 59' 02" de latitude oeste e 8° 13' 21" de longitude ao sul, em uma área de mata nativa da Caatinga (Figura 1). A maior parte do solo do município é da classe Planossolo Háplico, ao qual está inserida a amostra estudada, seguido das classes Argissolo Vermelho-Amarelo e Luvisolo Crômico, de acordo com o EMBRAPA (2001) e Araújo Filho (2018).

O clima é classificado como semiárido, sendo marcante verões quentes e poucos chuvosos e invernos com temperaturas amenas e maior quantidade de chuva. A vegetação, recorrente da caatinga, predomina espécies que apresentam adaptações à deficiência hídrica, em especial vegetação caducifólia, herbáceas anuais, suculência e espinhos possuindo arbustos e árvores de pequeno porte (Silva et al., 2003; Giulietti et al., 2004; Alvares et al., 2013; Arruda Neto et al., 2019; Arruda Neto et al., 2022).

Ensaio de campo

Para determinação das propriedades hidrodinâmicas do solo foi necessário a realização de ensaio de infiltração em campo, bem como coleta de amostras do solo para análise laboratorial. Antes do ensaio de infiltração foi coletado próximo ao local da realização do experimento uma amostra com cerca de 5 cm de profundidade para determinar a curva de distribuição do tamanho das partículas, a massa específica do solo e a massa específica das partículas do solo, sendo a análise realizada conforme descrito na Norma Técnica 7181:1984 (ABNT, 1984). Também, foram obtidas as umidades considerando a razão entre o volume de água da amostra e o volume total da amostra.

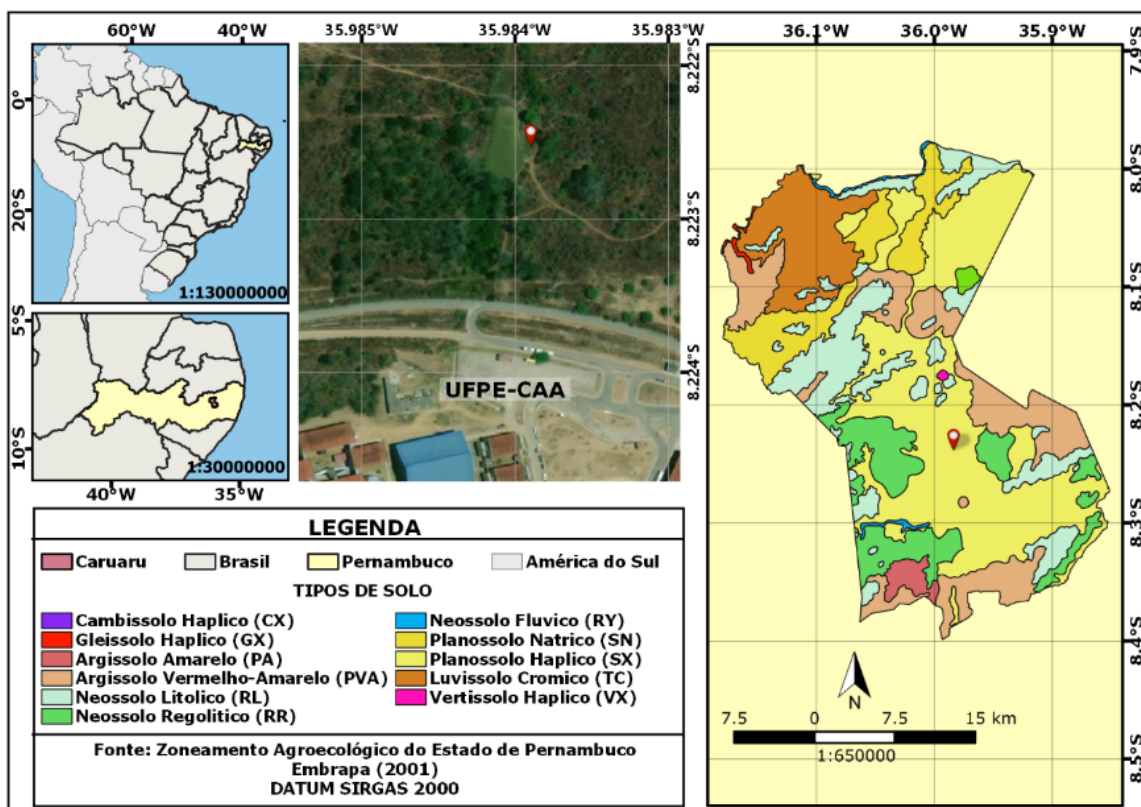


Figura 1. Área de estudo.

Com o ensaio de infiltração foi necessário a limpeza do solo onde se realizou o experimento, extraindo raízes, folhas, pedras e galhos para redução dos erros experimentais consideráveis à prática. Cravou-se um anel com 15 cm de diâmetro, chamado infiltrômetro (Figura 2), no solo a uma profundidade de aproximadamente 1 cm para que impedisse a perda lateral de água utilizada no exercício experimental e que garantisse ao mesmo tempo um fluxo constante na superfície.



Figura 2. Infiltrômetro de anel utilizado.

O ensaio de infiltração iniciou a partir do momento em que os volumes constantes, cerca de 75 mL de água foram vertidos continuamente dentro do anel, a partir do qual o tempo de infiltração começa a ser cronometrado. As leituras cessaram quando as velocidades de infiltração tenderam a ser constantes. Ao final, o solo dentro do perímetro do anel foi coletado e acondicionado dentro de um cilindro de volume conhecido para se obter em laboratório a umidade final.

Metodologia Beerkan

O método Beerkan é usado para determinar os parâmetros das curvas $\theta(h)$ e $K(\theta)$ de acordo com a textura e a estrutura do solo. Foi concebido por Haverkamp et al. (1994) possuindo vantagem quanto a outros métodos experimentais em função da sua simplicidade de aplicação, rapidez e com uso reduzido de pessoas e equipamentos (SANTOS et al., 2012).

O método faz uso dos modelos propostos por Van Genuchten (1980), para a curva de retenção de água $\theta(h)$ (Equação 1), e Brooks e Corey (1964), para a curva de condutividade hidráulica $K(\theta)$ (Equação 2), podendo descrever as curvas através de cinco parâmetros: dois de forma, m ou n e η , relacionado principalmente com a textura, e três de normalização θ_s , K_s e h_g , dependentes da estrutura do solo (Souza et al., 2008; Macêdo e Soares, 2020).

$$\theta(h) = (\theta_s - \theta_R) \cdot \left[1 + \left(\frac{h}{h_g} \right)^n \right]^{-m} + \theta_R, \text{ com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad (1)$$

$$K(\theta) = K_s \cdot \left(\frac{\theta - \theta_R}{\theta_s - \theta_R} \right)^\eta \quad (2)$$

onde θ é a umidade volumétrica [L^3/L^3]; θ_R e θ_S são respectivamente as umidades volumétricas residual e saturada [L^3/L^3]; h o potencial matricial [L]; h_g um valor de escala de h [L]; m e n os parâmetros de forma; K_s a condutividade hidráulica saturada do solo [L/T]; e η o parâmetro de forma para a curva de condutividade hidráulica.

Os parâmetros de forma e normalização foram obtidos por meio da utilização do algoritmo de análise de dados BEST (Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters) desenvolvido por Lassabatère et al. (2006), chamado por BEST-Slope (BSL). O BSL usa a primeira parte da curva de infiltração acumulada para se ajustar ao modelo de Haverkamp et al. (1994) e utiliza o valor da inclinação final para descrever o estado estacionário (Lassabatère et al., 2006). A escolha do BSL aconteceu pois, de acordo com Alagna et al. (2016), cujo algoritmo possui desempenho melhor que o BEST-Intercept (Yilmaz et al., 2010) e o BEST-Steady (Bagarello et al., 2014), quanto à regressão dos dados e ao erro relativo, possui também um melhor ajuste dos pontos medidos, quando comparado ao modelo de van Genuchten (1980).

A relevância e importância da metodologia é evidenciada quando diversos autores fizeram análises de caracterização hidrodinâmica dos solos dos quais os recentes trabalhos de Bouarafa et al. (2019), Ursulino et al. (2019), Di Prima et al. (2020), Bagarello, Caltabellota e Iovino (2021) e França Neto et al. (2021), no qual, em um escopo geral utilizaram a metodologia Beerkan e os algoritmos BEST para determinar os parâmetros das curvas e assim obter informações a respeito do solo estudado.

Determinação dos parâmetros de forma m, n e η

A equação de $F(D)$ foi proposta por Haverkamp e Parlange (1986) sendo obtida através da semelhança da configuração entre a curva de distribuição do tamanho das partículas $F(D)$ e da curva de retenção da água no solo $\theta(h)$:

$$F(D) = \left[1 + \left(\frac{D_g}{D} \right)^N \right]^{-M}, \text{ com } M = 1 - \frac{2}{N} \quad (3)$$

onde: D é o diâmetro da partícula [L]; D_g é o parâmetro de escala do tamanho das partículas [L]; e M e N são os parâmetros de forma da curva de distribuição do tamanho das partículas.

A relação entre os parâmetros da curva de retenção m e n e a curva de distribuição do tamanho das partículas M e N são alcançados através do índice de forma do meio P_m pelas equações a seguir:

$$m = \frac{1}{P_m} \left(\sqrt{1 + P_m^2} - 1 \right) \quad (4)$$

$$n = \frac{2}{1 - m} \quad (5)$$

Com o índice P_m obtido de acordo com Zataráin et al. (2003) (Equação 6) e as equações definidas em Fuentes et al. (1998) (Equação 7) e Fuentes (1992) (Equação 8):

$$P_m = \frac{MN}{1 + M} (1 + \kappa)^{-1} \quad (6)$$

$$\kappa = \frac{2s - 1}{2s(1 - s)} \quad (7)$$

$$(1 - \phi)^s + \phi^{2s} = 1, \text{ com } 1/2 < s < 1 \quad (8)$$

Nas equações acima κ é um coeficiente de relação; s é a dimensão fractal relativa dada por $s = D_f/E$ com D_f a dimensão fractal do solo e $E = 3$ a dimensão euclidiana, sendo s a raiz da Equação 8; e ϕ a porosidade do solo.

Para o parâmetro de forma η , referente à curva de condutividade hidráulica, a relação acontece como função do produto dos parâmetros de forma da curva de retenção de água no solo e do fator de tortuosidade p .

$$\eta = \frac{2}{m \cdot n} + 2 + p \quad (9)$$

com $p=1$ levando em conta o modelo de Burdine (1953).

Determinação dos parâmetros de normalização θ_s , K_s e h_g

O parâmetro de normalização θ_s foi estimado através da umidade gravimétrica saturada e da massa específica do solo. No caso do K_s e do h_g , foi utilizado modelagem dos experimentos de infiltração para determinação dos seus valores (Lassabatère, 2006).

Haverkamp et al. (1994) aproximam a infiltração acumulada tridimensional $I(t)$ e a taxa de infiltração $q(t)$ pelas equações para o regime de fluxo transitório (Equações 10 e 11) e estacionário (Equações 12 e 13):

$$I(t) = S\sqrt{t} + [AS^2 + BK_s]t \quad (10)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [AS^2 + BK_s] \quad (11)$$

$$I_{+\infty}(t) = [AS^2 + K_s]t + C \frac{S^2}{K_s} \quad (12)$$

$$q_{+\infty}(t) = q_{+\infty} = AS^2 + K_s \quad (13)$$

Com os valores de a , b e c dados por (Haverkamp et al., 1994):

$$A = \frac{\gamma}{r\Delta\theta} \quad (14)$$

$$B = \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta + \frac{2-\beta}{3} \cdot \left(1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right) \quad (15)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s}\right)^\eta\right] \cdot (1-\beta)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta}\right) \quad (16)$$

sendo S a sorvidade [$L/T^{1/2}$], r o raio do cilindro [L]; e, pelo fato de $\theta_0 < 0,25\theta_s$, γ igual a 0,75 e β igual a 0,6.

Para determinação de K_s e S , o BEST substitui o K_s em função da sorvidade S e da taxa de infiltração no regime estacionário $q_{+\infty}$ (Equação 17) nas equações de $I(t)$ e $q(t)$ (Equações 18 e 19), conforme abaixo (Lassabatère, 2006):

$$K_s = q_{+\infty} - AS^2 \quad (17)$$

$$I(t) = S\sqrt{t} + [A(1-B) \cdot S^2 + bq_{+\infty}]t \quad (18)$$

$$q(t) = \frac{S}{2\sqrt{t}} + [A(1-B) \cdot S^2 + bq_{+\infty}] \quad (19)$$

Baseado na formulação apresentada, Lassabatère et al. (2006) descreve as principais etapas do método BEST-Slope. A partir dos dados experimentais, aproxima-se a infiltração acumulada tridimensional $I^{\text{exp}}(t)$ e a taxa de infiltração $q^{\text{exp}}(t)$ no regime transitório e a taxa de infiltração assintótica $q_{+\infty}^{\text{exp}}$ para todo conjunto de dados. Em seguida, calcula as constantes A , B e C a partir dos parâmetros já definidos.

O BSL assume um valor máximo para a sorvidade considerando que o fluxo de água depende apenas da capilaridade, ou seja, $B=0$. O ajuste é, então, realizado minimizando as funções objetivos clássicas (Equações 19 e 20) e tem seu desempenho analisado a partir dos valores do erro quadrático médio.

$$f_I(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [I^{\text{exp}}(t_i) - I(t_i)]^2 \quad (20)$$

$$f_q(S, K_s, k) = \sum_{i=1}^k [q^{\text{exp}}(t_i^*) - q(t_i^*)]^2 \quad (21)$$

sendo k o número de pontos do regime transitório; e t^* dado por $t_i^* = \left(\frac{\sqrt{t_i} + \sqrt{t_{i+1}}}{2} \right)^2$.

Observando que as equações de infiltração acumulada e de taxa de infiltração são válidas apenas para o regime transitório, o ajuste pode não ser válido todos os valores de k . Com isso, a sorvidade é estimada para subconjuntos de k com o mínimo de cinco e o máximo representando toda a amostra (N_{tot}), considerando S_{MAX} o valor máximo de toda a sequência de pontos. Para se obter valores positivos de K_s , sorvidade máxima é definida por:

$$S_{\text{MAX}} = \text{MAX}_{k=5 \dots N_{\text{tot}}} \left[\text{MIN} \left(S_k(B=0), \sqrt{\frac{q_{+\infty}^{\text{exp}}}{A}} \right) \right] \quad (22)$$

Como os ajustes pela equação de infiltração acumulada nem sempre são válidos para todo conjunto de pontos, o BSL ajusta os dados para um mínimo de cinco e o máximo de N_{tot} . Assim, para cada subconjunto com os k primeiros pontos, o BEST estima a sorvidade $S(k)$, a condutividade hidráulica $K_s(k)$ em função de $S(k)$, estimado anteriormente e da Equação 17 para um tempo máximo determinado como:

$$t_{\text{max}} = \frac{1}{4(1-B)^2} \cdot t_{\text{grav}} \quad (23)$$

onde t_{grav} é o tempo gravimétrico definido por Philip (1969).

Com os valores de θ_s e K_s definidos, o parâmetro h_g é obtido pela seguinte equação.

$$h_g = \frac{S^2}{c_p(\theta_s - \theta_0) \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^\eta \right] \cdot K_s} \quad (24)$$

sendo c_p um parâmetro dependente dos parâmetros de formas n , m e h dos modelos (De Condappa et al., 2002; Lassabatère et al., 2006).

$$c_p = \Gamma \left(1 + \frac{1}{n} \right) \cdot \left[\frac{\Gamma \left(n\eta + \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta)} + \frac{\Gamma \left(n\eta + m - \frac{1}{n} \right)}{\Gamma(n\eta + m)} \right] \quad (25)$$

sendo Γ a função gama clássica.

Escalas características do solo

Como destaca Souza et al. (2008), fatores como geometria da fonte de água, capilaridade e gravidade tendem a prejudicar o fluxo de entrada de água no solo ao longo do processo de infiltração tridimensional. Para caracterizar esses fatores, existem os seguintes parâmetros: a escala de comprimento capilar λ_c [L], que é dada a partir de White e Sully (1987) (Equação 26), e o raio característico de poros hidraulicamente ativos λ_m [L], dado por Philip (1987) (Equação 27):

$$\lambda_c = \frac{\delta S^2}{(\theta_s - \theta_0)K_s} \quad (25)$$

$$\lambda_m = \frac{\sigma}{\rho_a g \lambda_c} \quad (26)$$

sendo σ a tensão superficial da água igual a $71,9 \cdot 10^{-3}$ N/m; ρ_a a massa específica da água igual a 1000 kg/m^3 ; g a aceleração da gravidade adotada como $9,8 \text{ m/s}^2$; e δ parâmetro de difusividade igual a 0,55 de acordo com indicação de White e Sully (1987).

Resultados e discussão

Após a coleta da amostra de solo no início do experimento, e posterior análise laboratorial, foram obtidos os seguintes resultados para massa específica do solo e massa específica dos grãos do solo, $1,4 \text{ g/cm}^3$ e $2,65 \text{ g/cm}^3$, respectivamente, o teor de umidade inicial foi igual a 0, não havendo resquícios de água no solo. Em posse dos valores dos diâmetros equivalentes e da porcentagem de material do solo que passa através de cada peneira durante o ensaio, foi traçada a curva de distribuição do tamanho das partículas conforme Figura 3.

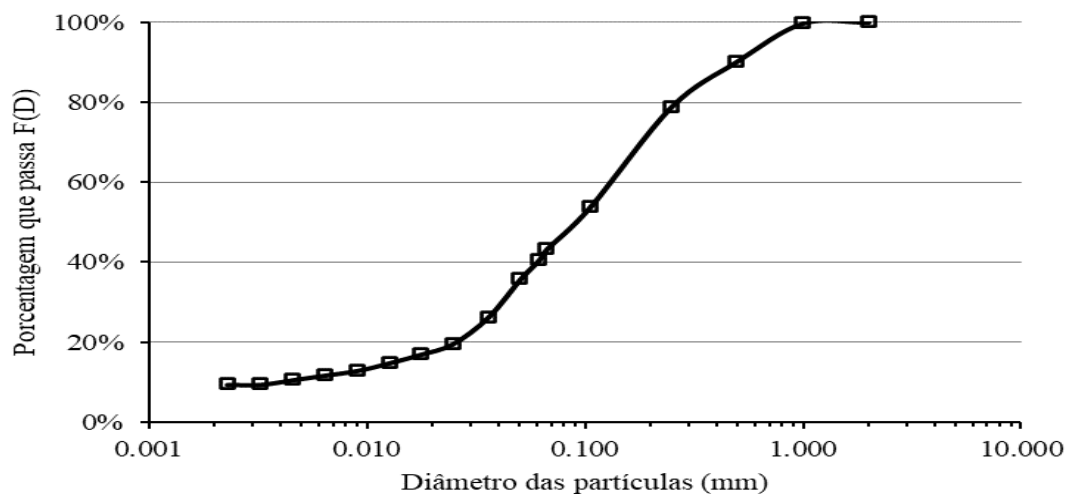


Figura 3. Curva de distribuição granulométrica.

Com base na curva granulométrica, foram determinadas as frações de areia, silte e argila de acordo com a Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Lemos e Santos (1984), estando representadas a partir do diagrama de classes texturais do solo (Figura 4) e da tabela contendo os limites entre as frações granulométricas (Tabela 1), sendo verificado que a amostra colhida é classificada como textura franco arenosa. Podemos observar que nas pesquisas desenvolvidas por Souza et al. (2008), Ursulino et al. (2019), Macêdo e Soares (2020) e França Neto et al. (2021), também foram encontrados em suas análises solos de textura fraco-arenosa. Na região do semiárido brasileiro, a classe franco-arenosa é predominante, consistindo em pouco profundas a profundas e com relativa capacidade de armazenamento de água. Isso pode ser explicado pois os solos dessa região se encontram em processo de intemperização, sendo pouco desenvolvidos, rasos e apresentam restrições ao uso como a deficiência de água e a suscetibilidade a processos erosivos (Silva et al., 2019; Gama e Jesus, 2020).

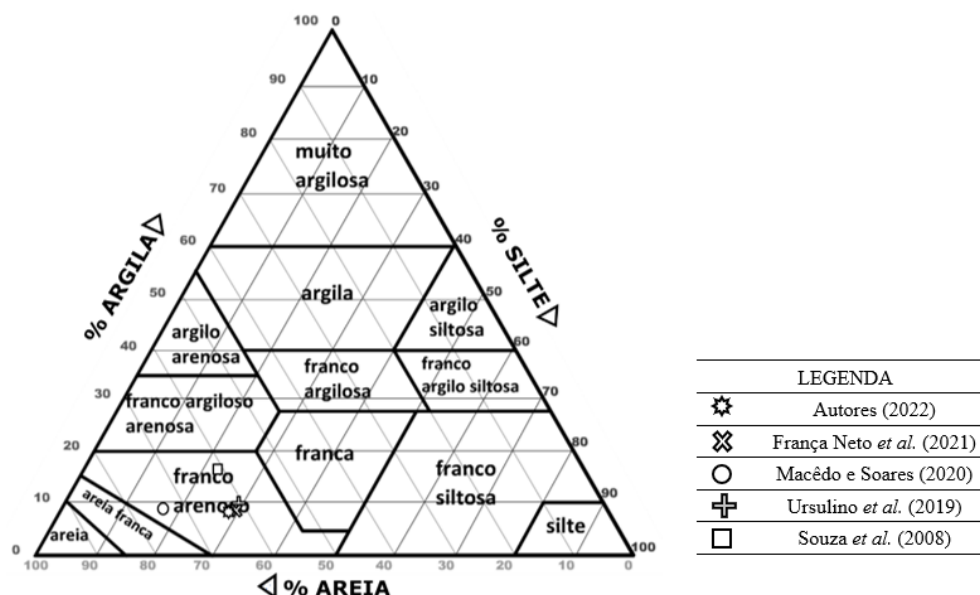


Figura 4. Diagrama das classes texturais do solo.

Tabela 1. Classes texturais do solo.

Nome	Limites (mm)	Porcentagem retida
Areia	Entre 2 e 0,05	64,240
Silte	Entre 0,05 e 0,002	26,380
Argila	Menor que 0,002	9,380

As curvas de infiltração acumulada e da taxa de infiltração em função do tempo estão representadas abaixo (Figura 5 (a) e (b)), na qual o tempo total de ensaio foi de 3237 segundos. O regime estacionário do ensaio aconteceu nos últimos quatro pontos medidos, onde se pode observar uma taxa de infiltração praticamente constante.

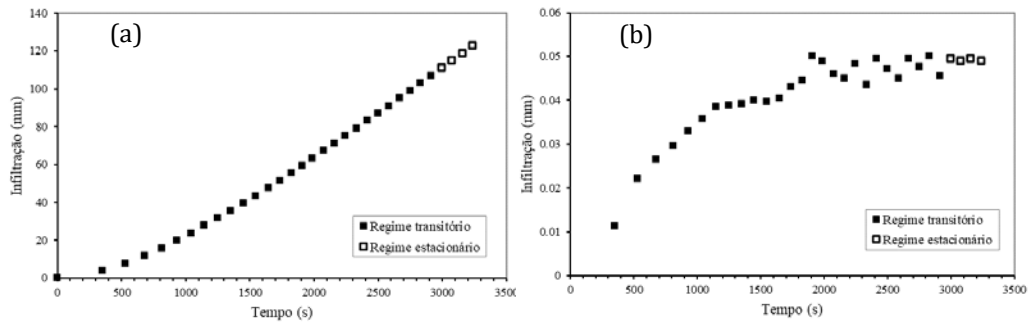


Figura 5. Curva de infiltração acumulada (a) e curva da taxa de infiltração (b).

Dessa forma, ao aplicar os dados no algoritmo BEST, foram obtidos os seguintes resultados para os parâmetros de forma na curva de distribuição granulométrica (Tabela 2) e para os parâmetros de forma das curvas de retenção e condutividade hidráulica, ao qual estão apresentados em conjunto com valores da literatura na Tabela 3. Os estudos da literatura escolhidos estão localizados na região do semi-árido nordestino ou no estado de Pernambuco, como forma de comparar os resultados obtidos.

Tabela 1. Parâmetros de forma da curva de distribuição granulométrica.

M	N	MN	D _g (mm)
0,220	2,563	0,564	0,327

Tabela 2. Parâmetros de forma das funcionais de $h(\theta)$ e $K(\theta)$.

Referências	Uso e localidade	Classe textural	m	n	η	c_p
Autores (2022)	Caatinga preservada em Caruaru-PE	Franco arenosa	0,121	2,276	10,259	2,178
França Neto et al. (2021)	Caatinga preservada em Caruaru-PE	Franco arenosa	0,11	2,24	11,01	-
Macêdo e Soares (2020)	Solo urbano em Recife-PE	Franco arenosa	0,083	2,181	13,559	2,460
Ursulino et al. (2019)	Zona de transição entre a zona úmida e a zona semi-árida com dominância do plantio de cana-de-açúcar em Vitória de Santo Antão-PE	Franco arenosa	0,102	2,223	11,482	-
Oliveira Júnior et al. (2014)	Caatinga preservada em São João-PE	-	0,133	2,311	9,96	-
Souza et al. (2008)	Região do semi-árido nordestino em São João do Cariri-PB	Franco arenosa	0,07	2,16	15,67	2,44

Pelo fato de os parâmetros de forma serem alcançados pela curva de distribuição dos tamanhos das partículas, observamos que os valores encontrados na pesquisa são

satisfatórios. Também é observado que os valores são mais próximos quando comparados com estudos referentes a áreas de caatinga preservada como o de Oliveira Júnior et al. (2014) e o de França Neto et al. (2021).

Com relação aos parâmetros de normalização de Beerkan, foram encontrados valores de umidades iguais a $\theta_0 = 0,000$ e $\theta_s = 0,472$ e parâmetros de escala característica do solo $\lambda_c = 1,028$ mm e $\lambda_m = 7,137$ mm. Podemos verificar os dados encontrados nessa pesquisa, assim como os valores médios da literatura, na Tabela 4.

Tabela 3. Parâmetros de normalização de Beerkan.

Referência	K_s (mm/s)	S (mm/s ^{1/2})	h_g (mm)
Autores (2022)	0,048	0,206	-0,858
França Neto et al. (2021)	0,02	0,245	-3,79
Macêdo e Soares (2020)	0,171	0,095	-0,056
Ursulino et al. (2019)	0,02	1,31	-1,85
Oliveira Júnior et al. (2014)	0,125	0,939	-16,67
Souza et al. (2008)	0,19	0,49	-14,5

O parâmetro h_g , se refere ao potencial de entrada de ar no solo, o valor foi de -0,858 mm, a condutividade hidráulica saturada, K_s igual a 0,048 mm/s e a sorvidade, que representa a capacidade do solo de absorver água por capilaridade de acordo com variação do teor volumétrico de água entre o início e final da infiltração (Oliveira Júnior et al., 2014), valendo 0,206 mm/s^{1/2}.

Os resultados obtidos foram, mais uma vez, mais próximos aos observados nos trabalhos de França Neto et al. (2021) e o de Oliveira Júnior et al. (2014). Isso ocorre pois, apesar de possuírem uma mesma classe textural, as diferenças podem ser atribuídas à distribuição dos tamanhos das partículas da fração de areia fina como à densidade do solo, além da influência do uso do solo que impactam no escoamento, evaporação e infiltração dos mesmos (Oliveira Júnior et al., 2014; Macêdo e Soares, 2020; França Neto et al., 2021).

Definidos os parâmetros das curvas para as equações do método, construíram-se as curvas de retenção $h(\theta)$ (Figura 5 (a)) e de condutividade de água no solo $K(\theta)$ (Figura 5 (b)). A respeito da curva de retenção de água, o solo apresenta pequena capacidade de retenção, para profundidade $h=1$ m a umidade do solo é cerca de 6,75%. Para a curva de condutividade, a condutividade sobe rapidamente para os teores de umidade mais baixos e tende a taxa de crescimento mais baixa conforme o solo atinge o estado de saturação, o que significa o comportamento esperado para essa curva.

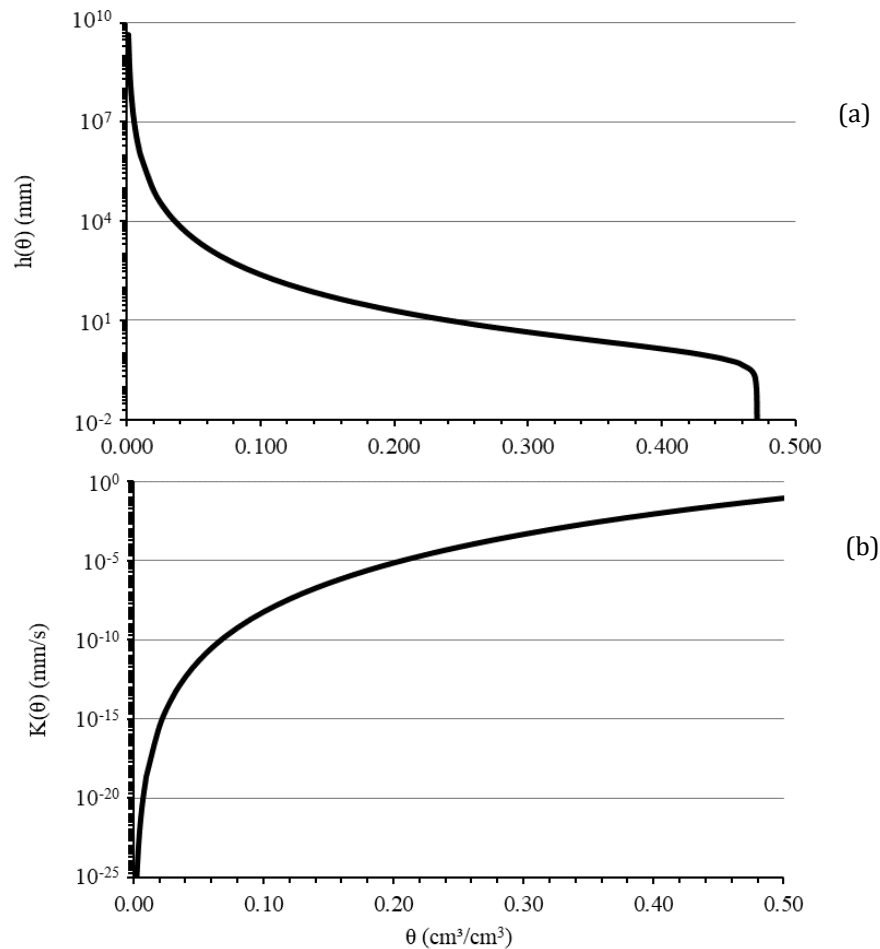


Figura 5. Curvas de retenção (a) e de condutividade de água no solo (b).

Conclusões

O Método Beerkan apresentou valores admissíveis para os parâmetros de forma e normalização dos solos analisados. Também, as curvas de retenção e de condutividade hidráulica apresentaram desempenho esperado e o processo forneceu ajustes concisos das infiltrações aglomeradas, expandindo a ideia dos processos hidrológicos na região estudada.

O procedimento se conservou adequado e ajustado para modelar a infiltração no campo, sem mencionar que ele admite a caracterização hidrodinâmica de diferentes solos e em vários pontos, por ser de utilização simples, acelerado e de baixo custo, tornando mais simplificado o estudo da variabilidade espacial das características hidráulicas dos solos.

Sugere-se para trabalhos futuros, que sejam desenvolvidas metodologias mais precisas para a determinação dos valores de β e γ . Além disso, são necessários estudos mais aprofundados para uma melhoria na aproximação matemática desenvolvida no método BEST, devido a alguns aspectos, dentre eles, destacam-se a definição de intervalos de validade de tempo para o uso de expansões aproximadas, que ainda não é exata.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Grupo de Gestão Ambiental Avançada (GAMA) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) e ao Centro Acadêmico do Agreste, Caruaru-PE, por todo o apoio e incentivo para o desenvolvimento da pesquisa. À Pró-Reitoria de Pós-Graduação (PROPG), à CAPES e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco (FACEPE), pelo incentivo das pesquisas desenvolvidas pelos alunos no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7181 - Análise granulométrica de solos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- Alagna, V.; Bagarello, V.; Di Prima, S.; Iovino, M. Determining hydraulic properties of a loam soil by alternative infiltrometer techniques. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 263-275, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10607>
- Alvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Gonçalves, J. L. M.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Araujo Filho, J. C. Perspectivas e desafios para o PronaSolos no Estado de Pernambuco. **Boletim Informativo do Núcleo Regional Nordeste da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 2, n. 2, p. 46-49, 2018.
- Arruda Neto, J. F.; Duarte, A. D.; Medeiros, I. S.; Aguiar, G. J. A.; Silva, G. L. Adequação de telhados verdes extensivos para a Cidade de Caruaru-PE baseada na média de precipitações chuvosas. In: Silva, H. C. (Org.). **Gestão de recursos hídricos e sustentabilidade 3**. 1. ed. Ponta Grossa: Atena, 2019. v. 1. p. 1-8.
- Arruda Neto, J. F.; Medeiros, I. S.; Aguiar, G. J. A.; Duarte, A. D.; Silva, G. L. Avaliação dos impactos das precipitações pluviométricas na manutenção da rede de esgotamento sanitário no Município de Caruaru, Agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 21, p. 3-19, 2022. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2022\)092101](https://doi.org/10.21438/rbgas(2022)092101)
- Bagarello, V.; Iovino, M. Testing the BEST procedure to estimate the soil water retention curve. **Geoderma**, v. 187/188, p. 67-76, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.04.006>
- Bagarello, V.; Di Prima, S.; Giordano, G.; Iovino, M. A test of the Beerkan Estimation of Soil Transfer parameters (BEST) procedure. **Geoderma**, v. 221, p. 20-27, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.017>
- Bagarello, V.; Caltabellotta, G.; Iovino, M. Water transmission properties of a sandy-loam soil estimated with Beerkan runs differing by the infiltration time criterion. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 69, n. 2, p. 151-160, 2021. <https://doi.org/10.2478/johh-2021-0010>

- Bouarafa, S.; Lassabatere, L.; Lipeme-Kouyi, G.; Ângulo-Jaramillo, R. Hydrodynamic characterization of sustainable urban drainage systems (SuDS) by using Beerkan infiltration experiments. **Water**, v. 11, n. 4, Article number 660, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11040660>
- Brooks, R. H.; Corey, T. A. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Papers, Colorado State University**, v. 24, p. 1-37, 1964.
- Burdine, N. T. Relative permeability calculations from pore size distribution data. **Journal of Petroleum Technology**, v. 5, n. 3, p. 71-78, 1953. <https://doi.org/10.2118/225-G>
- De Condappa, D.; Soria, J. M.; Ângulo-Jaramillo, R.; Haverkamp, R. **Méthode Beerkan. Caractérisation des propriétés hydrodynamiques des sols non saturés: rapport interne Hydrologie de la Zone Non Saturés-LTHE**. Grenoble: Université de Grenoble, 2002.
- Di Prima, S.; Lassabatère, L.; Bagarello, V.; Iovino, M.; Angulo-Jaramillo, R. Testing a new automated single ring infiltrometer for Beerkan infiltration experiments. **Geoderma**, v. 262, p.20-34, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.006>
- Di Prima, S.; Stewart, R. D.; Castellini, M.; Bagarello, V.; Najm, M. R. A.; Pirastru, M.; Giadrossich, F.; Iovino, M. Ângulo-Jaramillo, R.; Lassabatère, L. Estimating the macroscopic capillary length from Beerkan infiltration experiments and its impact on saturated soil hydraulic conductivity predictions. **Journal of Hydrology**, v. 589, 125159, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125159>
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Agroecológico de Pernambuco (ZAPE)**. 2001. Disponível em: <http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode:solo_pernambuco_wgs84>. Acesso em: 01 set. 2021.
- França Neto, J. M.; Coutinho, A. P.; Di Prima, S.; Bezerra, S. T. M.; Santos, S. M. N.; Rabelo, A. E. C. G. C.; Oliveira, A. L.; Antonino, A. C. D. Variability and spatial distribution of hydrodynamic properties in soil with preserved Caatinga. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, e20, 2021. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.262120210058>
- Fuentes, C. R. **Approche fractale des transferts hydriques dans les sols non-saturés**. Grenoble: Université Joseph Fourier, 1992. (Tese de doutorado).
- Fuentes, C.; Vauclin, M.; Parlange, J. Y.; Haverkamp, R. Soil water conductivity of a fractal soil. In: Baveye, P.; Parlange, J. Y.; Stewart, B. A. (Eds.). **Fractals in soil science**. Boca Raton: CRC, 1998. p. 325-335.
- Gama, D. C.; Jesus, J. B. Principais solos da região semiárida do Brasil favoráveis ao cultivo do *Eucalyptus* L'Heritier. **Biofix Scientific Journal**, v. 5, n. 2, p. 214-221, 2020. <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i2.70968>
- Giulietti, A. M.; Bocage Neta, A. L.; Castro, A. A. J. F.; Gamarra-Rojas, C. F. L.; Sampaio, E. V. S. B.; Virgínio, J. F.; Queiroz, L. P.; Figueiredo, M. A.; Rodal, M. J. N.; Barbosa, M. R. V.; Harley, R. M. (Orgs.). **Diagnóstico da vegetação nativa do Bioma Caatinga**. Brasília: MMA, 2004.
- Guo, J. C. Y. Green concept in storm water management. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, v. 2, n. 3, p. 1-8, 2013. <https://doi.org/10.4172/2168-9768.1000114>
- Haverkamp, R.; Parlange, J.-Y. Predicting the water-retention curve from particle-size distribution: 1. Sandy soils without organic matter. **Soil Science**, v. 142, n. 6, p. 325-339, 1986.
- Haverkamp, R.; Ross, P. J.; Smettem, K. R. J.; Parlange, J.-Y. Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 2. Physically based infiltration equation. **Water Resources Research**, v. 30, p. 2931-2935, 1994. <https://doi.org/10.1029/94WR01788>

Lassabatère, L.; Ângulo-Jaramillo, R.; Ugalde, J. M. S.; Cuenca, R.; Braud, I.; Haverkamp, R. Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments - BEST. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, n. 2, p. 521-532, 2006. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0026>

Lemos, R. C.; Santos, R. D. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 2. ed. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1984.

Lima, S. M. S. A. **Expansão urbana e sustentabilidade**: dinâmica dos padrões espaciais e das alterações na cobertura do solo na Cidade de Teresina. Teresina: Universidade Federal do Piauí, 2018. (Tese de doutorado).

Macêdo, G.; Soares, W. Utilização de métodos de campo e laboratoriais para estimação de propriedades hidrodinâmicas do solo. **Águas Subterrâneas**, v. 34, n. 2, p. 166-176, 2020. <https://doi.org/10.14295/ras.v34i2.29809>

Mascarenhas, P. V. S. **Modelagem fracionária do fluxo de água em meio poroso não saturado**. Brasília: Universidade de Brasília, 2018. (Dissertação de mestrado).

Minasny, B.; MacBratney, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimates of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v. 107, n. 1/2, p. 55-70, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00138-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00138-0)

Minasny, B.; MacBratney, A. B.; Bristow, K. L. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v. 93, n. 3/4, p. 225-253, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00061-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00061-0)

Niehoff, D.; Bronstert, A.; Burger, G. Effects of climate and land-use change on storm runoff generation: Present knowledge and modelling capabilities. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 509-529, 2002. <https://doi.org/10.1002/hyp.326>

Oliveira Júnior, J. A. S.; Souza, E. S.; Correa, M. M.; Lima, J. R. S.; Souza, R. M. S.; Silva Filho, L. A. Variabilidade espacial de propriedades hidrodinâmicas de um Neossolo Regolítico sob pastagem e Caatinga. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 6, p. 631-639, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000600010>

Philip, J. R. The quasilinear analysis, the scattering analog, and other aspects of infiltration and seepage. In: Fok, Y. S. (Ed.). **Infiltration development and application**. Honolulu: Water Resources Research Center, 1987. p. 1-27.

Philip, J. R. Theory of infiltration. In: Chow, V. T. (Ed.). **Advances in Hydrosience**. Cham: Elsevier, 1969. v. 5. p. 215-296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>

Santos, C. A. G.; Silva, J. F. C. B. C.; Silva, R. M. Caracterização hidrodinâmica dos solos da bacia experimental do Riacho Guaraíra utilizando o Método Beerkan. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 4, p. 149-160, 2012.

Silva, J. M. C.; Tabarelli, M.; Fonseca, M. T.; Lins, L. V. (Orgs.). **Biodiversidade da Caatinga**: áreas e ações prioritárias para a conservação. Brasília: Ministério do Meio Ambiente; Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2003.

Silva, W. T. S.; Alves, F. J. B.; Leonardo, F. A. P.; Santos, R. V.; Farias Júnior, J. A. Levantamento da textura do solo e da relação silte/argila em regiões semiáridas do Nordeste. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 14, n. 4, p. 266-272, 2019.

Soares, W. A.; Silva, S. R.; Lima, J. R. S. Land-use change effect on the hydro-dynamic characteristics of soil in the Brazilian semi-arid region. **Revista Ambiente & Água**, v. 15, n. 2, e2368, 2020. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2368>

- Souza, E. S.; Antonino, A. C. D.; Ângulo-Jaramillo, R.; Maciel Netto, A. Caracterização hidrodinâmica de solos: Aplicação do Método Beerkan. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 2, p. 128-135, 2008. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000200004>
- Ursulino, B. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Coutinho, A. P.; Coelho, V. H. R.; Araújo, D. C. S.; Gusmão, A. C. V.; Santos Neto, S. M.; Lassabatère, L.; Ângulo-Jaramillo, R. Modelling soil water dynamics from soil hydraulic parameters estimated by an alternative method in a tropical experimental basin. **Water**, v. 11, n. 5, 1007, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11051007>
- Van Genuchten, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- Wagner, B.; Tarnawski, V. R.; Hennings, V.; Muller, U.; Wessolek, G.; Plagge, R. Evaluation of pedo-transfer functions for unsaturated soil hydraulic conductivity using an independent data set. **Geoderma**, v. 102, n. 3/4, p. 275-297, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00037-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00037-4)
- White, I.; Sully, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v. 23, n. 8, p. 1514-1522, 1987. <https://doi.org/10.1029/WR023i008p01514>
- Yilmaz, D.; Lassabatère, L.; Ângulo-Jaramillo, R.; Deneele, D.; Legret, M. Hydrodynamic characterization of basic oxygen furnace slag through an adapted BEST method. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 1, p. 107-116, 2010. <https://doi.org/10.2136/vzj2009.0039>
- Zataráin, F.; Fuentes, C.; Haverkamp, R.; Antonio, A. C. D. Predicción de la forma de la característica de humedad del suelo a partir de la curva granulométrica. Anales del Congreso Nacional de Irrigación, Zacatecas, v. 2, p. 212-219, 2003.



Informação da Licença: Este é um artigo Open Access distribuído sob os termos da Licença Creative Commons Attribution, que permite uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que a obra original seja devidamente citada.