

Simulação hidrológica de biorretenção: análise de eficiência de técnicas compensatórias para mitigar impactos da urbanização

Hydrological simulation of bioretention: analysis of the efficiency of compensatory techniques to mitigate impacts of urbanization

Flavio Souza Azevedo^{1*} , Geovany Jessé Alexandre da Silva¹ ,
José Augusto Ribeiro da Silveira¹ , Mauro Normando Macêdo Barros Filho² 

RESUMO

A rápida urbanização das cidades tem gerado inúmeras consequências para os sistemas de drenagem de águas pluviais: aumento do escoamento superficial, piora da qualidade das águas subterrâneas e de sua escassez, causando inundações e afetando a saúde da população urbana. Uma alternativa para mitigar esses efeitos adversos é a inserção de práticas de *low impact development*, tais como pavimentos permeáveis, telhados verdes e células de biorretenção. Utilizando o modelo computacional Hydrus-1D, foi realizada uma simulação dos fluxos de água em meio poroso similar ao que ocorre em uma biorretenção, com dados de amostras de solo de uma área localizada em João Pessoa (PB). A infiltração do solo foi avaliada em ensaios de campo com o uso do infiltrômetro modificado Philip-Dunne. Parâmetros de desempenho hidrológico de um sistema de biorretenção foram investigados variando-se a altura de perfis de solo (100, 120, 130 e 150 cm), a profundidade de retenção na superfície (10, 20 e 30 cm) e a duração da chuva (20 e 60 min). Os resultados da simulação demonstraram que os melhores benefícios hidrológicos foram obtidos com chuvas de menor duração, com redução do pico de fluxo e do escoamento superficial de 100% para retenções de 20 e 30 cm.

Palavras-chave: drenagem urbana; modelagem hidrológica; sustentabilidade; infraestrutura verde.

ABSTRACT

The rapid urbanization of cities has generated numerous consequences for rainwater drainage systems: increased surface runoff, worsening quality, and scarcity of groundwater, causing floods and affecting the health of the urban population. An alternative to mitigate these adverse effects is the insertion of Low Impact Development (LID) practices such as permeable pavements, green roofs, and bioretention cells. Using the HYDRUS-1D computational model a simulation of water flows in a porous medium was performed, similar to what occurs in a bioretention, with data from soil samples from an area located in João Pessoa-PB. Soil infiltration was evaluated in field trials using a modified Philip-Dunne infiltrometer (MPD). Hydrological performance parameters of a bioretention system were investigated by varying height of soil profiles (100, 120, 130, and 150 cm), surface retention depth (10, 20, and 30 cm), and duration of rainfall (20 and 60 min). The simulation results showed that better hydrological benefits were obtained with shorter rainfall, with peak flow and surface runoff reduction by 100% for retentions of 20 and 30 cm.

Keywords: Urban drainage. Hydrological modelling. Sustainability. Green infrastructure.

INTRODUÇÃO

Por causa da rápida urbanização e dos fenômenos climáticos extremos, os problemas hídricos atuais nas cidades incluem mais inundações urbanas, exploração excessiva de águas subterrâneas, desperdício e poluição de águas pluviais. O uso excessivo de construção cinza, como concreto e asfalto, no desenvolvimento urbano criou superfícies impermeáveis que não são capazes de absorver água (JIA *et al.*,

2015; NGUYEN *et al.*, 2019), comprometendo a qualidade da água, bem como a sustentabilidade dos sistemas de drenagem urbana (LIU *et al.*, 2014), afetando o ambiente natural e alterando os processos hidrológicos, ecológicos e biológicos (GRIMM *et al.*, 2008; TRINH; CHUI, 2013; MGUNI; HERSLUND; JENSEN, 2016).

Em muitas cidades modernas, os elementos naturais da paisagem tornaram-se menos importantes: os recursos hídricos são muito menos visíveis, e a presença de

¹Universidade Federal da Paraíba - João Pessoa (PB), Brasil.

²Universidade Federal de Campina Grande - Campina Grande (PB), Brasil.

*Autor correspondente: azevedo.flavio@hotmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 04/10/2020 - Aceito: 18/06/2022 - Reg. ABES: 20200349

água é frequentemente tratada como um incômodo (inundação) ou desperdício (esgoto), e não como um recurso (BUURMAN; PADAWANGI, 2018). Todavia, a água está voltando ao cenário urbano de muitas cidades por novas abordagens e soluções verdes e sustentáveis, baseadas nos conceitos de infraestrutura verde (FLETCHER *et al.*, 2015). Nesse sentido, práticas como *low impact development* (LID), isto é, desenvolvimento de baixo impacto ou técnicas compensatórias, como também são conhecidas no Brasil, têm ganhado popularidade, sendo caracterizadas por dispositivos de tratamento de águas pluviais de menor escala, como células de biorretenção, telhados verdes e pavimentos permeáveis.

Na escala da instalação, as células de biorretenção podem fornecer simultaneamente vários benefícios hídricos e ambientais mais sustentáveis, como melhoria da qualidade da água, mitigação de riscos de inundação, restauração do balanço hídrico (YANG; CHUI, 2018) e aprimoramento estético (LIU *et al.*, 2014). Essas células ou sistemas de biorretenção consistem em pequenas áreas escavadas e preenchidas com uma mistura de solo de alta permeabilidade e matéria orgânica projetada para maximizar a infiltração de água e o crescimento vegetativo (DAVIS *et al.*, 2009). Uma estrutura de entrada é criada para rotear o escoamento urbano de águas pluviais da área circundante para a unidade, enquanto uma estrutura para desvios de fluxo acima da capacidade de retenção é adicionada (ROY-POIRIER; CHAMPAGNE; FILION, 2010).

Sistemas de biorretenção são projetados para capturar o escoamento de águas pluviais de bacias impermeáveis, para reduzir as cargas poluentes na superfície (DIETZ; CLAUSEN, 2008; MCINTYRE *et al.*, 2016; RYCEWICZ-BORECKI; MCLEAN; DUPONT, 2017), reduzir volumes de escoamento e a taxa de pico de fluxo (DAVIS *et al.*, 2009; WINSTON; DORSEY; HUNT, 2016; LIU; FASSMAN-BECK, 2017), aumentar a evapotranspiração, a infiltração e a recarga das águas subterrâneas (GÜLBÄZ; KAZEZYILMAZ-ALHAN, 2017).

Em drenagem urbana, a modelagem computacional, aliada a ferramentas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento, pode poupar tempo e economizar recursos financeiros, desde que apresente resultados com precisão adequada. Apesar da falta de modelos ou ferramentas abrangentes de práticas de infraestrutura verde que possam modelar o processo natural complexo que ocorre nessas instalações (KAYKHOSRAVI; KHAN; JADIDI, 2018), alguns modelos são comumente usados para simular o desempenho de sistemas de biorretenção, tais como: DRAINMOD, RECARGA, SWMM (LIU *et al.*, 2014; WINSTON; DORSEY; HUNT, 2016), GIFMod (MASSOUDIEH *et al.*, 2017) e MUSIC (IMTEAZ *et al.*, 2013).

Além dos modelos computacionais citados, o programa de domínio público Hydrus-1D, de elementos finitos que simula o movimento unidimensional de água, tem sido amplamente utilizado para estimar fluxos de água em técnicas compensatórias, como, por exemplo, trincheiras de infiltração (MUJOVO, 2014); telhados verdes (SANTOS *et al.*, 2013) e pavimento permeável (COSTA *et al.*, 2020).

O Hydrus-1D foi usado por Liu e Fassman-Beck (2017) para avaliar a resposta hidrológica de misturas de solos em colunas de laboratório representando configurações de telhados verdes e biorretenção. Segundo as autoras, empregou-se o modelo nesse estudo por causa da sua capacidade de modelar fluxo uniforme e preferencial dos meios porosos.

Li *et al.* (2018) recorreram ao Hydrus-1D para analisar a influência do tipo de mistura, a espessura do solo de plantio, a precipitação e a concentração de poluentes nos efeitos de purificação de tanques de biorretenção experimentais e concluíram que os efeitos de redução do volume de água e carga de poluentes foram significativamente menores com o aumento das cargas de entrada de água.

Estudando o desempenho hidrológico de duas células de biorretenção, Meng *et al.* (2014) empregaram o Hydrus-1D para avaliar parâmetros de projeto (tempo de retorno, profundidade e tipo do meio filtrante e área da superfície). Os resultados desse estudo revelaram que melhor capacidade de detenção é observada para eventos de chuva menores, meios filtrantes mais profundos e chuvas de projeto com tempo de retorno menor que dois anos.

Seguindo essas considerações, este estudo teve como objetivos simular e analisar o desempenho hidrológico de um sistema com configuração implícita de uma biorretenção usando o modelo Hydrus-1D. Amostras de solo de uma área localizada no *campus* I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) foram investigadas, e a condutividade hidráulica foi determinada com ensaios de infiltração empregando-se o infiltrômetro Philip-Dunne (MPD). A economia de tempo e a simplicidade na aplicação das técnicas empregadas neste estudo permitem identificar áreas urbanas com aptidão para implantação de células de biorretenção, otimizar os parâmetros de projeto e garantir uma concepção adequada, com base científica, na construção desses sistemas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Descrição da área de estudo e coleta de amostras

O *campus* I da UFPB está localizado na cidade de João Pessoa, capital do estado da Paraíba, no litoral da região nordeste (Figura 1). O clima é tropical quente e úmido com chuvas no inverno, temperaturas médias em torno de 27°C e precipitação acumulada anual de cerca de 1.900 mm (INMET, 2020).

De acordo com a pesquisa de campo desenvolvida neste estudo, foram identificados no *campus* I da UFPB 17 estacionamentos formais com aproximadamente 10 ha de área total onde poderiam ser implantadas células de biorretenção, contudo a maioria desses estacionamentos apresentava superfícies totalmente impermeáveis ou pequenos canteiros. Esse aspecto condicionou a escolha do estacionamento do bloco da reitoria como objeto de estudo mais adequado, tendo em vista o acesso direto ao solo na área dos canteiros existentes, bem como a possibilidade de realizar os ensaios de infiltração com o MPD para capturar a variabilidade espacial que normalmente ocorre com as taxas de infiltração (AHMED *et al.*, 2014).

A determinação das propriedades físicas do solo foi realizada mediante a coleta de duas amostras deformadas em dois canteiros até a profundidade de 1 m (Figura 2). Para a escolha dos locais de coleta das amostras, foram observados os canteiros de maior área, de modo que o solo apresentasse características mais próximas possíveis do seu estado natural.

Os ensaios de caracterização física do solo foram conduzidos no Laboratório de Geologia e Pavimentação, do Centro de Tecnologia da UFPB, e constaram: da análise granulométrica, Norma Brasileira (NBR) 7181 (ABNT, 2016); da classificação textural, NBR 6502 (ABNT, 1995a); da densidade das partículas do solo, ME-093 (DNER, 1994); da densidade do solo por ASTM C-29/C29M (ASTM, 2003); e do coeficiente de permeabilidade, NBR 13292 (ABNT, 1995b).

Ensaio de infiltração pelo método do infiltrômetro modificado Philip-Dunne

Para os ensaios de infiltração de campo deste estudo, foi utilizado o método do infiltrômetro MPD. A teoria do MPD usa as premissas do modelo de infiltração de Green-Ampt, uma adaptação do infiltrômetro original de poço de

Philip-Dunne (AHMED; GULLIVER; NIEBER, 2011; NESTINGEN *et al.*, 2018). Essa metodologia permite testes rápidos, com pouco volume de água para infiltração, e foi empregada, por exemplo, por Asleson *et al.* (2009) para monitorar o desempenho de jardins de chuva e por Ahmed, Gulliver e Nieber (2011) para comparar o cálculo da condutividade hidráulica saturada (K_s) utilizando o MPD e o infiltrômetro de anel duplo. A Figura 3A mostra o diagrama conceitual do MPD, e a Figura 3B, o dispositivo construído para esta pesquisa.

A formulação matemática para obtenção de K_s compreende as Equações 1, 2 e 3, que podem ser consultadas em Ahmed *et al.* (2014) e em Nestingen *et al.* (2018). A Equação 1 é usada para resolver $R(t)$. As duas propriedades desconhecidas do solo, K_s e Ψ , são determinadas minimizando-se a soma da diferença absoluta de $\Delta P(t)$, calculada pelas Equações 2 e 3.

$$\frac{[H_{in} - H(t)]r_1^2}{\Delta\theta} = \frac{[2[R(t)]^3 + 3[R(t)]^2L_{max} - L_{max}^3 - 4r_0^3]}{3} \quad (1)$$

$$\Delta P(t) = \frac{\pi^2}{8} \left\{ (\theta_1 - \theta_0) \frac{([R(t)]^2 + [R(t)]L_{max})}{K_s} \frac{dR}{dt} - 2r_0^2 \right\} \times \frac{\ln \left[\frac{R(t)[r_0 + L_{max}]}{r_0[R(t) + L_{max}]} \right]}{L_{max}} \quad (2)$$

$$\Delta P(t) = \Psi - H(t) - L_{max} + \frac{L_{max}}{K_s} \frac{dH}{dt} \quad (3)$$

Em que:

H_{in} : altura inicial de água dentro do tubo (cm);

$H(t)$: altura de água acima da superfície (cm);

$R(t)$: raio do fundo do infiltrômetro para a frente molhada (cm);

L_{max} : profundidade de penetração do dispositivo no solo (cm);

r_0 : raio da fonte esférica (cm);

r_1 : raio do tubo cilíndrico (cm);

ΔP : queda de potencial de pressão de capilaridade pela fonte esférica para a frente de umedecimento;

Ψ : altura ou pressão de sucção da frente de umedecimento (cm);

t : tempo (s);

K_s : condutividade hidráulica ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$);

θ_0 : umidade volumétrica inicial ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$);

θ_1 : umidade volumétrica final ($\text{cm}^3\cdot\text{cm}^{-3}$).

Segundo Ahmed *et al.* (2014), a Equação 1 é válida para $R > \sqrt{(r_1^2 + L_{max}^2)}$, e o raio da fonte esférica, definido como $r_0 = 0,5 \times r_1$.

Para os resultados da condutividade hidráulica, buscou-se identificar os dados discrepantes utilizando-se o critério de rejeição de Chauvenet. Por esse

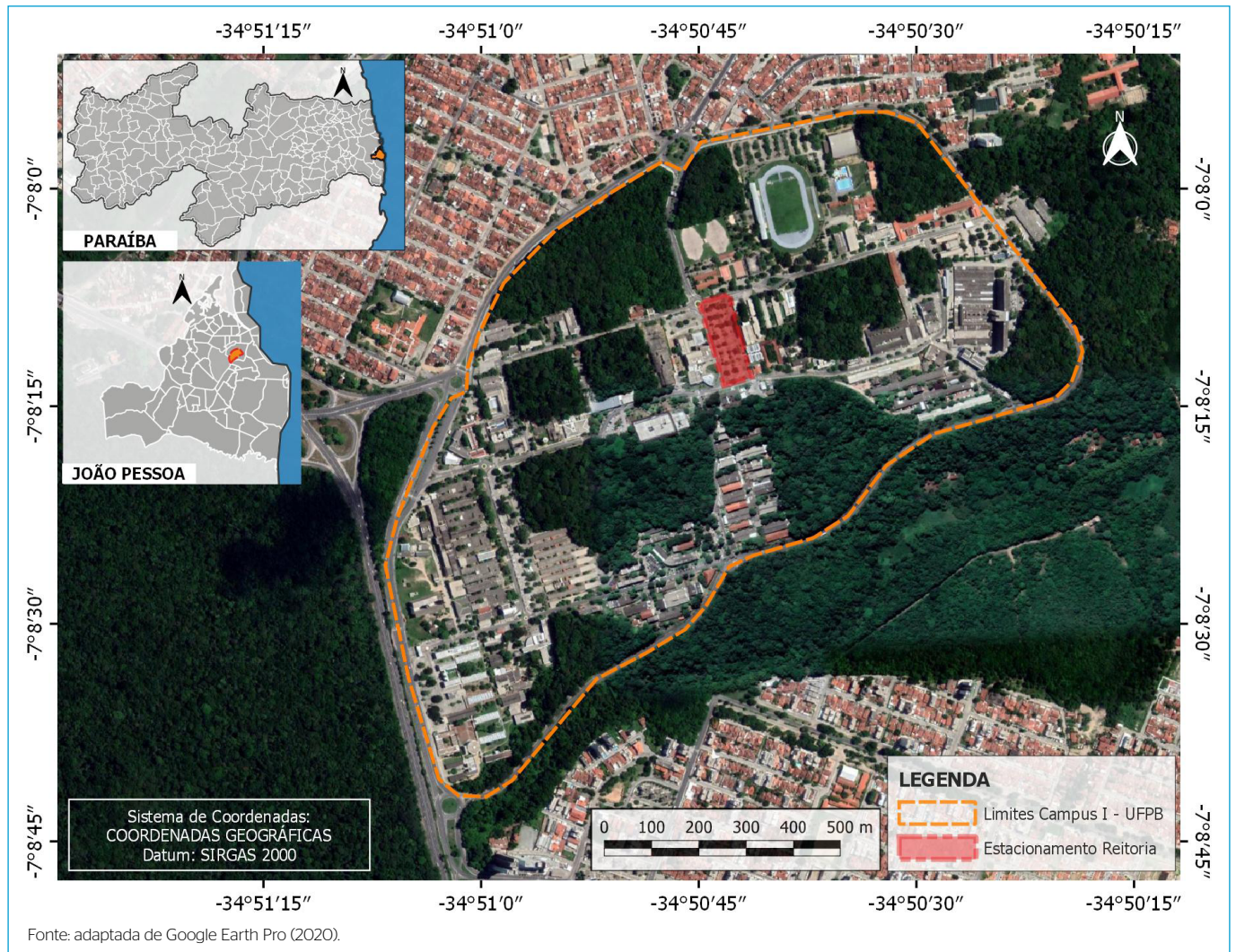


Figura 1 - Localização do campus I da Universidade Federal da Paraíba, em João Pessoa (PB), Brasil.

critério, conforme a Equação 4, o desvio de cada um dos valores em relação à média é comparado com o desvio padrão do conjunto de dados, multiplicado pela constante de Chauvenet ($k_{(n)}$). Os valores de $k_{(n)}$ podem ser encontrados em Vuolo (1996), em função do número de medições.

$$|x_j - \bar{x}| > k_{(n)} \cdot \sigma \text{ (para rejeição de } x_j) \tag{4}$$

Em que:

x_j : valor testado do conjunto de dados;

n : número de medições;

$k_{(n)}$: constante de Chauvenet para n medições;

\bar{x} : média dos valores medidos;

σ : desvio padrão do conjunto de dados.

Parâmetros hidrológicos locais

Para o cálculo da altura pluviométrica (P), foi aplicada a relação intensidade-duração-frequência para João Pessoa (Equação 5), com os parâmetros conforme Aragão et al. (2000).

$$i = \frac{290 \times T_R^{0,087}}{(t + 10)^{0,398}} \tag{5}$$

Em que:

i : intensidade de precipitação (mm.h^{-1});

T_R : tempo de retorno (anos);

T : duração da chuva (min).

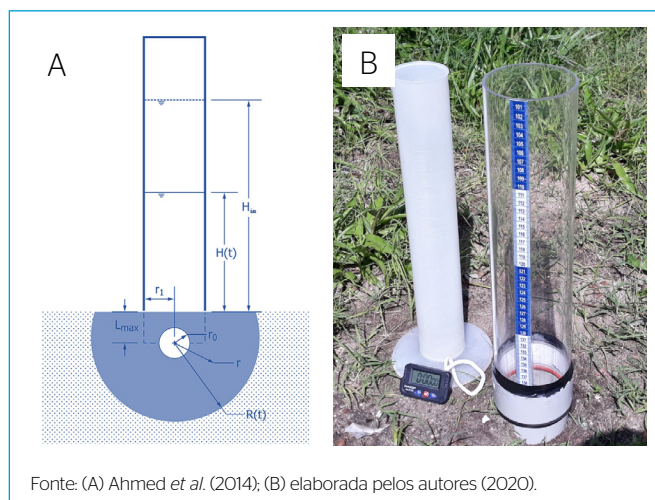
O tempo de retorno adotado foi de cinco anos e tem por base os valores observados na literatura para microbacias de drenagem (TUCCI, 2003). Nessa mesma linha, Baptista, Nascimento e Barraud (2011) consideram compatíveis técnicas compensatórias em áreas de drenagem pequenas (< 4 ha) e controle de vazão de pico para tempo de retorno de até cinco anos.

O tempo de duração da chuva de projeto adotado foi igual ao tempo de concentração (t_c) da bacia ($t = t_c$) e três vezes o tempo de concentração ($t = 3.t_c$), para comparar a influência desse parâmetro no cálculo da precipitação efetiva e simular a resposta hidrológica com o modelo. Considerando que a maioria dos métodos de cálculo existentes para o cálculo de (t_c) foi desenvolvida de medições em bacias rurais e as distorções pelos diversos métodos (CANHOLI, 2014), foi determinada a média aritmética dos resultados obtidos por meio de cinco fórmulas diferentes para o cálculo de (t_c), conforme as Equações 6, 7, 8, 9 e 10 (SILVEIRA, 2005):

$$t_c = 0,057(1000/CN-9)^{0,7} \cdot L^{0,8} \cdot S^{-0,5} \text{ SCS Lag} \tag{6}$$

$$t_c = 0,0828 \cdot L^{0,24} \cdot S^{-0,16} \cdot A_{imp}^{-0,26} \text{ Schaake} \tag{7}$$

$$t_c = 2,25 \cdot i^{-0,7164} \cdot L^{0,5552} \cdot S^{-0,2070} \text{ McCuen} \tag{8}$$



Fonte: (A) Ahmed et al. (2014); (B) elaborada pelos autores (2020).

Figura 3 - (A) Diagrama conceitual do infiltrômetro modificado Philip-Dunne; (B) infiltrômetro modificado Philip-Dunne desenvolvido para a pesquisa.

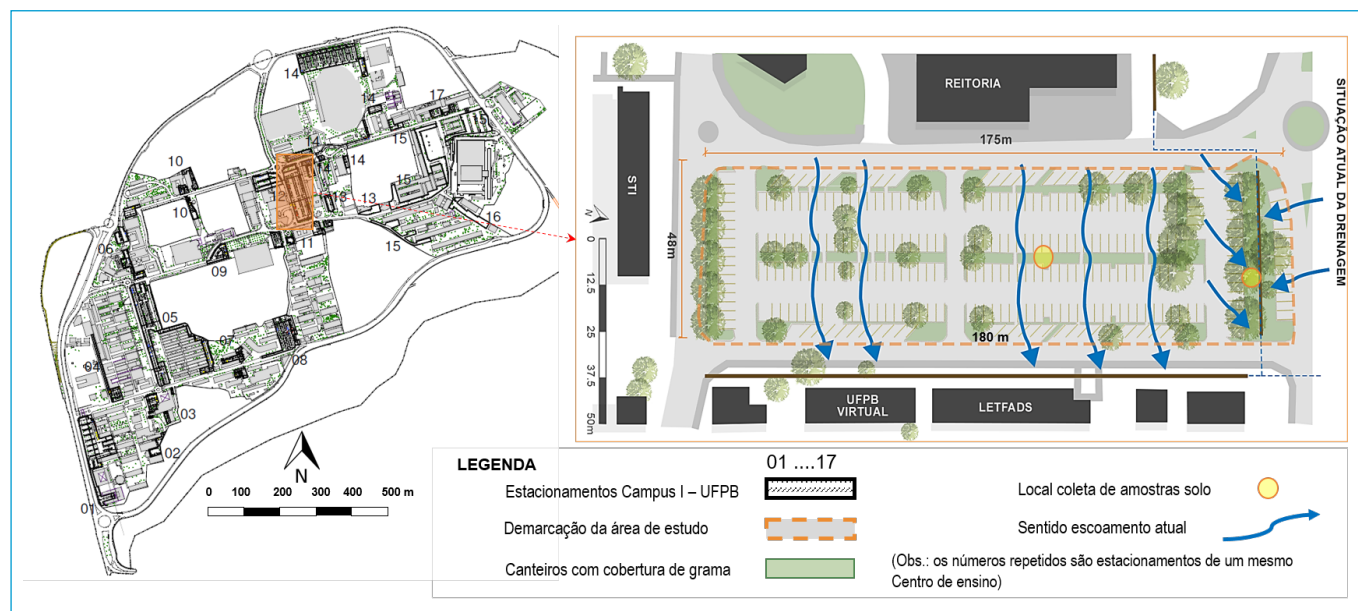


Figura 2 - Detalhes da área de estudo: à esquerda, a localização dos estacionamentos do campus I da Universidade Federal da Paraíba; à direita, o estacionamento do bloco da reitoria.

$$t_c = 0,0977 \cdot L^{0,6} \cdot S^{-0,3} \text{ Carter} \tag{9}$$

$$t_c = 0,0869 \cdot A_t^{0,3039} \cdot S^{0,3832} \cdot A_{imp}^{-0,4523} \text{ Desbordes} \tag{10}$$

Em que:

t_c : tempo de concentração (h);

A_t : área total da bacia (km²);

A_{imp} : área impermeável (km²);

A_{per} : área permeável (km²);

L : comprimento do percurso hidráulico (km);

S : declividade média do percurso hidráulico (m.m⁻¹);

i : intensidade da chuva (mm.h⁻¹).

O parâmetro CN (adimensional) é o número de curva, que varia em função do tipo de solo e da ocupação e uso da bacia de drenagem (USDA, 1986). O grupo hidrológico do solo foi classificado segundo Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005), e enquadraram-se as condições de umidade antecedente (AMC) de acordo com McCuen (1998).

A Tabela 1 sumariza os dados da microbacia de estudo. O CN composto foi calculado pela média ponderada, considerando as áreas permeáveis e impermeáveis.

Para estimar o escoamento direto ou excesso de precipitação, foi utilizado o método do número de curva do Natural Resources Conservation Service/ Soil Conservation Service (NRCS-SCS) dos Estados Unidos (USDA, 1986), conforme a Equação 11.

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}, \text{ para } P \geq I_a \tag{11}$$

Em que:

R : escoamento direto (mm);

$P = i \times t$: altura pluviométrica (mm);

I_a : abstração inicial (mm);

S : retenção máxima potencial da bacia (mm).

O método NRCS-SCS estabelece que $I_a = 0,2 \times S$ (USDA, 1986), condição adotada neste trabalho, com S (mm) calculado pela Equação 12.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{12}$$

Por meio do método dos blocos alternados, a distribuição temporal da chuva de projeto foi obtida com a parcela mais intensa na metade da duração da chuva. A proporção da área de biorretenção para a área contribuinte da

Tabela 1 - Parâmetros da microbacia de estudo.

Áreas da bacia (km ²)	CN	t_c (h)	T_R (anos)	Solo (grupo)	AMC	L (km)	S (m.m ⁻¹)
$A_t = 8,33 \times 10^3$	94			B	II	0,180	0,001
$A_{imp} = 6,44 \times 10^3$	98	0,34 ^a	5				
$A_{per} = 1,89 \times 10^3$	74						

^amédia dos valores calculados com as Equações 6, 7, 8, 9 e 10; CN: número de curva; t_c : tempo de concentração; T_R : tempo de retorno; AMC: condições de umidade antecedente; L: comprimento do percurso hidráulico; S: declividade média do percurso hidráulico.

bacia de drenagem geralmente varia de 5 a 10% (LI *et al.*, 2020), e neste trabalho foi adotada a igual a 5%. Essa proporção pode ser convertida em uma taxa de confluência de 20:1. A Tabela 2 apresenta os valores calculados para a chuva de projeto e os parâmetros utilizados.

Configurações de contorno e dados de entrada para modelagem com o Hydrus-1D

O Hydrus-1D é um programa que resolve numericamente a Equação 13, conhecida como a equação de Richards para fluxo unidimensional (LIBARDI, 2018), por meio do método dos elementos finitos, e oferece várias funções analíticas para descrever as propriedades hidráulicas do solo. Neste estudo, optou-se pelo modelo de Van Genuchten-Mualem (VAN GENUCHTEN, 1980) para meios com estrutura de poros unimodal (Equações 14 e 15).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \tag{13}$$

Em que:

T : variável de tempo (min);

Z : variável espacial vertical, positiva para cima (cm);

$K(\theta)$: condutividade hidráulica em função da umidade (cm.min⁻¹);

h : carga hidráulica, equivalente da energia potencial matricial (cm);

θ : conteúdo volumétrico de água (cm³.cm⁻³).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{1}{1 + (\alpha |h|)^n} \right]^m, & (h < 0) \\ \theta_s, & (h \geq 0) \end{cases} \tag{14}$$

$$K(\theta) = K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\} \tag{15}$$

Em que:

θ_r : umidade residual (cm³.cm⁻³);

θ_s : umidade de saturação (cm³.cm⁻³);

h : carga hidráulica, equivalente da energia potencial matricial (cm);

K_s : condutividade hidráulica saturada (cm.min⁻¹);

α : sucção de admissão de ar recíproca (cm⁻¹);

n : índice de distribuição de tamanho dos poros;

l : índice de conectividade dos poros do meio (geralmente 0,5);

m : 1-1/n.

No presente estudo, as condições de contorno no limite superior foram determinadas pela taxa de precipitação aplicada, com a seleção da opção atmosférico com camada superficial. O limite inferior foi definido como face de escoamento, fluxo zero nas laterais e condições iniciais em conteúdo de água. O intervalo de tempo de discretização da chuva foi de 1 min para duração de chuva de 20 min e de 2 min para duração de chuva de 60 min, sendo o tempo total de simulação para os dois casos 300 min. A umidade volumétrica inicial foi de 0,15 cm³.cm⁻³ e corresponde ao valor mínimo determinado nos ensaios

Tabela 2 - Intensidade de chuva, precipitação e precipitação excedente.

T_R (anos)	t_c (min)	t (min)	i (mm.h ⁻¹)	P (mm)	R (mm)	Taxa de confluência
5	20	20	86,2	28,7	15,6	20:1
		60	61,5	61,5	45,6	

T_R : tempo de retorno; t_c : tempo de concentração; t : tempo; i : intensidade da chuva; P: altura pluviométrica; R: escoamento direto.

de infiltração. A presença de vegetação e o efeito da evapotranspiração não foram considerados por causa da escala de tempo curta da simulação, condição também adotada por Liu e Fassman-Beck (2017). Modelaram-se quatro profundidades de perfis de solo z (100, 120, 130 e 150 cm) e três alturas de retenção na superfície $ret.$ (10, 20 e 30 cm). O esquema gráfico das condições de contorno e um exemplo de seção transversal de uma biorretenção são apresentados na Figura 4.

Métricas de desempenho

Considerando os benefícios hidrológicos da implantação de células de biorretenção, algumas métricas de desempenho podem ser expressas com base na redução percentual do pico de fluxo (Equação 16), redução percentual do volume de escoamento (Equação 17) e reposição para o solo natural em termos de lâmina infiltrada. Essa abordagem é semelhante à adotada por Yang e Chui (2018).

$$R_{PF_{z,ret}} = \frac{q_i - q_{z,ret}}{q_i} \times 100 \quad (16)$$

Em que:

$R_{PF_{z,ret}}$: redução percentual do pico de fluxo (%);

q_i : fluxo de pico ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) para o caso de não implantação da biorretenção, representado pelo pico da precipitação excedente i ;

$q_{z,ret}$: pico de fluxo ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$), em caso de implantação da biorretenção com camada de profundidade z e altura de retenção $ret.$

$$R_{V_{z,ret}} = \frac{V_i - V_{z,ret}}{V_i} \times 100 \quad (17)$$

Em que:

$R_{V_{z,ret}}$: redução percentual do volume (%), em termos de lâmina de escoamento superficial;

V_i : lâmina de escoamento superficial (cm) para o caso de não implantação da biorretenção, representada pela lâmina escoada da precipitação excedente i ;

$V_{z,ret}$: lâmina escoada (cm), em caso de implantação da biorretenção com camada de profundidade z e altura de retenção $ret.$

A recarga subterrânea (R_s) foi calculada com base no volume determinado pelo modelo, até o tempo de 300 min, levando-se em conta a infiltração para o solo natural na base do perfil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Seguindo a sequência de procedimentos de ensaios normalizados descritos na metodologia, a Tabela 3 traz os resultados da caracterização física do solo, enquanto a Tabela 4 apresenta os resultados estatísticos dos ensaios de infiltração obtidos com o MPD.

Para a determinação dos parâmetros hidráulicos do solo, o Hydrus-1D possui em sua interface um complemento (Roseta Lite v. 1.1) que estima esses parâmetros usando as proporções granulométricas e a densidade de solos padronizados. Assim, com os valores médios de campo da Tabela 3, o complemento ajusta os parâmetros apresentados na Tabela 5.

Os hidrogramas resultantes da simulação para chuvas de duração 20 e 60 min são mostrados nos Apêndices 1 e 2, respectivamente. Os resultados da redução de pico de fluxo e do volume de escoamento superficial, calculados pela produção do modelo, estão demonstrados na Tabela 6 para chuva de 20 min de duração. A redução do pico de fluxo foi de 49% com altura de retenção de 10 cm, e de 100% para alturas de retenção de 20 e 30 cm. O escoamento superficial diminuiu 74%, com altura de retenção de 10 cm, e 100% para alturas de retenção de 20 e 30 cm.

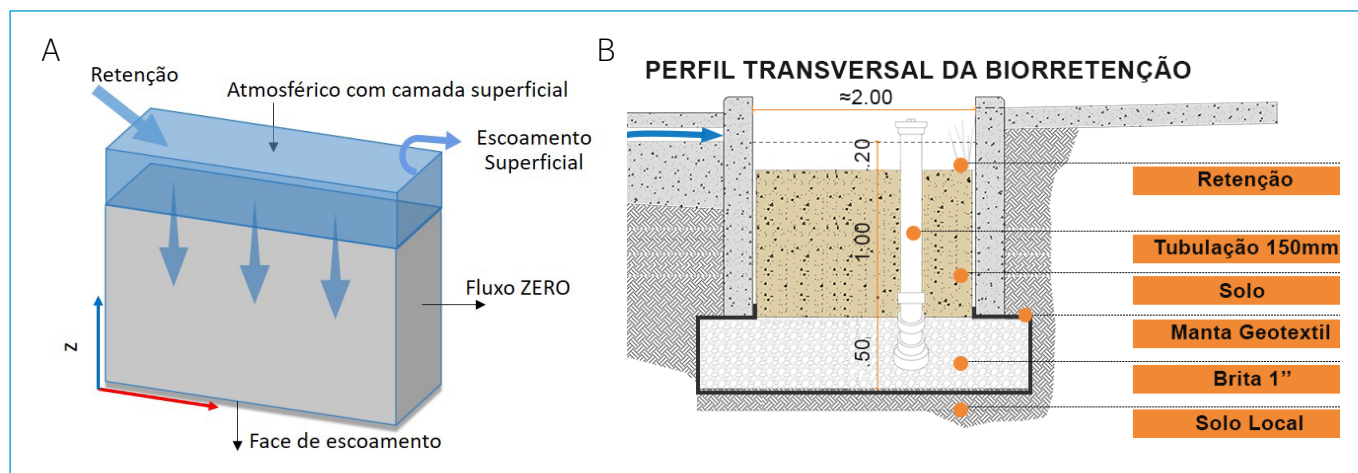


Figura 4 - (A) Esquema gráfico das condições de contorno e (B) exemplo de seção de uma biorretenção.

Tabela 3 - Resumo das propriedades físicas do solo determinadas em laboratório.

Amostra	Areia total (%)	Silte (%)	Argila (%)	$K_{20^{\circ}\text{C}}$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	ρ_s ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ρ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	92,1	7,9	ND ^(a)	$8,03 \times 10^{-3}$	2,60	1,376
2	92,7	7,3	ND ^(a)	$8,48 \times 10^{-3}$	2,63	1,371
Média	92,4	7,6	ND ^(a)	$8,25 \times 10^{-3}$	2,62	1,374

ρ_s : densidade das partículas do solo; ρ : densidade do solo; $K_{20^{\circ}\text{C}}$: coeficiente de permeabilidade do solo, referida à temperatura de 20°C.; ^(a)não determinado pelo ensaio de granulometria por sedimentação por causa da natureza arenosa dos grãos do solo, que não permitiram leitura do densímetro.

Quando a duração da chuva era de 60 min, conforme Tabela 7, a redução do pico de fluxo foi de 18%, com altura de retenção de 10 cm; 39%, para altura de retenção de 20 cm; e de cerca de 60%, para 30 cm de altura de retenção. O escoamento superficial reduziu 47%, com altura de retenção 10 cm; 60%, para altura de retenção 20 cm; e 73%, para 30 cm de altura de retenção. Embora o tempo de duração da chuva tenha aumentado de 20 para 60 min (aumento de 200%) — e também a precipitação excedente (de 15,6 para 45,6 mm, conforme Tabela 2) —, a simulação indica que a eficiência da célula de biorretenção diminui, mas ainda é satisfatória ($R_{pf} \cong 60\%$ e $R_v \cong 73\%$), desde que adotada altura de retenção de 30 cm para qualquer profundidade do perfil de solo.

Os resultados demonstram que a redução do desempenho da biorretenção, quanto às taxas de redução de pico de fluxo e escoamento superficial, com o aumento do influxo recebido por esses sistemas, são consistentes com os resultados alcançados por Li *et al.* (2018) e por Li *et al.* (2020). Nesses estudos, os autores apontam que as taxas de redução do volume de água proporcionadas pelos sistemas de biorretenção diminuíram com o aumento do volume de influxo de água. Por exemplo, Li *et al.* (2018) afirmam que a redução do volume de água diminuiu de 79,76 para 43,79%, quando o período de retorno foi aumentado de um para dez anos. Analisando colunas experimentais de biorretenção, Gülbaz e Kazezyilmaz-Alhan (2017) concordam que a porcentagem de redução de pico de fluxo diminui quando a duração das chuvas aumenta. Esses autores encontraram taxa de redução de fluxo de 33% para duração de 15 min e 21% para duração de 30 min, quando a intensidade de chuva constante foi 16 mm.h⁻¹.

Em relação às profundidades dos perfis e alturas de retenção, os resultados da simulação, especialmente para duração de chuva de 60 min, sugerem que tanto a redução do pico de fluxo quanto a redução do escoamento superficial são objetivamente influenciadas pelas alturas de retenção; e que a influência das profundidades dos perfis de solo foi insignificante. Esses resultados alinham-se com os obtidos por Meng *et al.* (2014), para quem a profundidade do meio só tem um impacto benéfico em sistemas de biorretenção na detenção de água, enquanto tem pouca ou nenhuma influência na eficácia hidrológica desses sistemas.

Os resultados da simulação para variação do desempenho hidrológico, no que se refere à recarga subterrânea, são mostrados na Tabela 8.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de infiltração com o infiltrômetro modificado Philip-Dunne.

Estatísticas	θ_0 (cm ³ .cm ⁻³)	θ_1 (cm ³ .cm ⁻³)	Ks (cm.s ⁻¹)
Varição	(0,15-0,23)	(0,32-0,44)	(1,17×10 ⁻³ -9,34×10 ⁻³)
θ^a	0,19	0,38	7,22×10 ⁻³
θ^b	0,19	0,39	7,92×10 ⁻³
σ^b	0,03	0,04	2,42×10 ⁻³
CV ^b	14,5%	10%	30,6%

^aMédia do conjunto de ensaios; ^bestatística após aplicação do critério de Chauvenet; CV: coeficiente de variação.

Tabela 5 – Parâmetros hidráulicos do solo para o modelo de Van Genuchten-Mualem.

Camada	θ_r (cm ³ .cm ⁻³)	θ_s (cm ³ .cm ⁻³)	α (cm ⁻¹)	n (-)	Ks (cm.min ⁻¹)	l (-)
Única	0,0456	0,418	0,0398	2,890	0,48 ^a	0,5

^aO valor de Ks foi ajustado para o valor médio encontrado nos ensaios de infiltração de campo; K_s: condutividade hidráulica saturada; n: índice de distribuição de tamanho dos poros; l: índice de conectividade dos poros do meio.

Os valores de R_s , pelos resultados obtidos, aumentam à medida que as alturas de retenção também aumentam. Assim, para o perfil de 100 cm e duração de chuva de 20 min, os valores de R_s variam de 142 (para *ret.* = 10 cm) a 222 mm (para *ret.* = 30 cm). Para duração de 60 min, R_s varia de 329 (para *ret.* = 10 cm) a 567 mm (para *ret.* = 30 cm). Essa tendência de aumento de R_s também é verificada para as demais profundidades dos perfis, para alturas de retenção maiores. A esse respeito, Gülbaz e Kazezyilmaz-Alhan (2017) enfatizam que a altura de retenção é um fator dominante no pico de vazão de saída de colunas de biorretenção, resultando em diminuição no tempo de pico de saída e aumento da taxa de vazão de pico para aumento da altura de retenção. Fisicamente, a profundidade de retenção na superfície de uma célula de biorretenção causa pressão hidrostática da água que leva a alto gradiente de pressão entre os pontos de entrada e saída do perfil do solo.

Nos gráficos de escoamento inferior para chuvas de 20 e 60 min contidos nos Apêndices 1 e 2, respectivamente, o modelo prevê atraso na ocorrência de vazão de cerca de 40 (z = 100 cm) até 60 min (z ≥ 120 cm). Em colunas de

Tabela 6 – Redução de pico de fluxo (R_{pf}) e redução do escoamento superficial (R_v) para simulação com tempo de duração da chuva 20 min e retenção de 10, 20 e 30 cm.

Perfil z (cm)	R_{pf} (%)			R_v (%)		
	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)
100	49,2	100	100	74	100	100
120	49,1	100	100	74,6	100	100
130	49,1	100	100	74,7	100	100
150	49,1	100	100	74,7	100	100

Tabela 7 – Redução de pico de fluxo (R_{pf}) e redução do escoamento superficial (R_v) para simulação com tempo de duração de chuva 60 min e retenção de 10, 20 e 30 cm.

Perfil z (cm)	R_{pf} (%)			R_v (%)		
	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)
100	18,1	39,3	59,6	46,4	59,8	72,9
120	18	39,3	59,6	47,4	60	73
130	18	39,3	59,6	47,5	60,1	73,1
150	18	39,3	59,6	47,5	60,1	73

Tabela 8 – Recarga subterrânea (R_s) para chuva de 20 e 60 min e retenção de 10, 20 e 30 cm.

Perfil z (cm)	R_s (mm)			R_s (mm)		
	Duração t = 20 (min)			Duração t = 60 (min)		
	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)	10 (cm)	20 (cm)	30 (cm)
100	142	222	222	329	449	567
120	131	208	208	324	433	548
130	124	200	200	315	425	538
150	107	182	182	295	404	515

laboratório com 100 cm de altura, Liu e Fassman-Beck (2017) obtiveram atraso de aproximadamente 30 min em meio poroso baseado em areia marinha e composto orgânico submetido a altas taxas de influxo.

CONCLUSÃO

Utilizando um modelo numérico, a pesquisa descrita no presente estudo analisou o processo hidrológico unidimensional (1D) em perfis de solo arenoso com configurações variadas da altura do meio poroso e da camada de retenção, típicas de uma célula de biorretenção. As seguintes conclusões foram alcançadas com base nas simulações realizadas:

- As taxas de redução do pico de fluxo e do escoamento superficial dos perfis de solo analisados foram reduzidas com o aumento do volume de influxo de água, conforme o aumento de duração da chuva;
- Para duração de chuva igual ao tempo de concentração, a eficiência hidrológica do sistema foi 100% efetiva para retenções iguais ou maiores que 20 cm, sugerindo que o sistema poderia capturar toda a água roteada para a célula de biorretenção, qualquer que fosse a altura do perfil analisado;
- A eficiência do sistema é influenciada pela altura de retenção na superfície de uma célula de biorretenção em detrimento das alturas dos perfis do solo. Uma vez que as taxas de influxo analisadas neste estudo superam a taxa de infiltração do solo, condicionada pela condutividade hidráulica (Ks), o solo atingirá rapidamente sua capacidade de infiltração e o volume excedente deverá ser armazenado na superfície;

- As taxas de vazão nas bases dos perfis de solo analisados aumentaram à medida que a altura de retenção variou de 10 a 30 cm, o que pode ser fisicamente explicado pela pressão hidrostática que a profundidade de retenção na superfície proporciona.

Os resultados deste estudo sugerem que as práticas de LID, como as células de biorretenção, têm o potencial de minimizar os efeitos da urbanização no gerenciamento das águas pluviais urbanas. Essas práticas facilitam a infiltração de águas pluviais, reduzem o escoamento superficial e aumentam a recarga das reservas de águas subterrâneas. As técnicas aplicadas nesta pesquisa podem contribuir para a avaliação preliminar da eficiência e os benefícios hidrológicos esperados de uma biorretenção e, por conseguinte, fundamentar tecnicamente decisões quanto ao seu emprego na gestão da drenagem urbana.

Futuras pesquisas poderão investigar diferentes composições de solos brasileiros e modelar fluxos de água para estudos de eficiência e viabilidade de instalações de biorretenção.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Azevedo, F.S.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Recursos, Validação, Visualização, Escrita — Primeira Redação, Escrita — Revisão e Edição. Silva, G.J.A.: Metodologia, Validação, Visualização, Escrita — Primeira Redação. Silveira, J.A.R.: Metodologia, Escrita — Primeira Redação. Barros Filho, M.N.M.: Metodologia, Escrita — Primeira Redação.

REFERÊNCIAS

- AHMED, F.; GULLIVER, J.S.; NIEBER, L. A new technique to measure infiltration rate for assessing infiltration of BMPs. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON URBAN DRAINAGE*, 12., 2011, Porto Alegre. *Anais...* 2011. p. 1-8. Disponível em: <http://www.landprofile.com/pdf/PAPO04847.pdf>. Acesso em: 25 set. 2020.
- AHMED, F.; NESTINGEN, R.; NIEBER, J.L.; GULLIVER, J.S.; HOZALSKI, R.M. A modified Philip-Dunne infiltrometer for measuring the field-saturated hydraulic conductivity of surface soil. *Vadose Zone Journal*, v. 13, n. 10, p. 1-14, 2014. <https://doi.org/10.2136/vzj2014.01.0012>
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). *ASTM C29/C29M-17a*: standard test method for bulk density ("unit weight") and voids in aggregate. West Conshohocken: ASTM, 2003.
- ARAGÃO, R.; FIGUEIREDO, E.E.; SRINIVASAN, V.S.; GOIS, R.S.S. Chuvas intensas no estado da Paraíba. *In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 5., 2000, Natal. *Anais...* Natal: ABRH, 2000. p. 74-85.
- ASLESON, B.C.; NESTINGEN, R.S.; GULLIVER, J.S.; HOZALSKI, R.M.; NIEBER, J.L. Performance assessment of rain gardens. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 45, n. 4, p. 1019-1031, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2009.00344.x>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 6502*: Rochas e Solo. Rio de Janeiro: ABNT, 1995a.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 7181*: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 13292*: Solo - Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro: ABNT, 1995b.
- BAPTISTA, M.B.; NASCIMENTO, N.O.; BARRAUD, S. *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2011. 318 p.
- BUURMAN, J.; PADAWANGI, R. Bringing people closer to water: integrating water management and urban infrastructure. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 61, n. 14, p. 2531-2548, 2018. <https://doi.org/10.1080/09640568.2017.1404972>
- CANHOLI, A.P. *Drenagem urbana e controle de enchentes*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.
- COSTA, I.R.D.A.; COUTINHO, A.P.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; RABELO, A.E.C.D.G.D.C.; SANTOS NETO, S.M.D.; ALVES, E.M.; ANTONINO, A.C.D. Sensitivity of hydrodynamic parameters in the simulation of water transfer processes in a permeable pavement. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 25, e47, 2020. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190188>
- DAVIS, A.P.; HUNT, W.F.; TRAVER, R.G.; CLAR, M. Bioretention technology: overview of current practice and future needs. *Journal of Environmental Engineering*, v. 135, n. 3, p. 109-117, 2009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2009\)135:3\(109\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2009)135:3(109))

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). *ME 093/94: Solos - determinação da densidade real. Método de ensaio*. DNER, 1994. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/metodo-de-ensaio-me/dner_me_093_94-1.pdf. Acesso em: 26 set. 2020.
- DIETZ, M.E.; CLAUSEN, J.C. Stormwater runoff and export changes with development in a traditional and low impact subdivision. *Journal of Environmental Management*, v. 87, n. 4, p. 560-566, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.026>
- FLETCHER, T.D.; SHUSTER, W.; HUNT, W.F.; ASHLEY, R.; BUTLER, D.; ARTHUR, S.; TROWSDALE, S.; BARRAUD, S.; SEMADENI-DAVIS, A.; BERTRAND-KRAJEWSKI, J.; MIKKELSEN, P.S.; RIVARD, G.; UHL, M.; DAGENAIS, D.; VIKLANDER, M. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more - the evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525-542, 2015. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>
- GOOGLE EARTH PRO. *Portal*. Disponível em: <https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/versions/#download-pro>. Acesso em: 25 set. 2020.
- GRIMM, N.B.; FAETH, S.H.; GOLUBIEWSKI, N.E.; REDMAN, C.L.; WU, J.; BAI, X.; BRIGGS, J.M. Global change and the ecology of cities. *Science*, v. 319, n. 5864, p. 756-760, 2008. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C.M. Experimental investigation on hydrologic performance of LID with rainfall-watershed-bioretenition system. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 22, n. 1, p. 1-10, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001450](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001450)
- IMTEAZ, M.A.; AHSAN, A.; RAHMAN, A.; MEKANIK, F. Modelling stormwater treatment systems using MUSIC: accuracy. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 71, p. 15-21, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.11.007>
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Normais climatológicas do Brasil*. INMET, 2020. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 26 mar. 2020.
- JIA, H.; YAO, H.; TANG, Y.; YU, S.L.; FIELD, R.; TAFURI, A.N. LID-BMPs planning for urban runoff control and the case study in China. *Journal of Environmental Management*, v. 149, p. 65-76, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.003>
- KAYKHOSRAVI, S.; KHAN, U.T.; JADIDI, A. A comprehensive review of low impact development models for research, conceptual, preliminary and detailed design applications. *Water*, v. 10, n. 11, 1541, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10111541>
- LIBARDI, P.L. *Dinâmica da água no solo*. 3ª ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2018. 341 p.
- LI, J.; ZHAO, R.; LI, Y.; CHEN, L. Modelling the effects of parameter optimization on three bioretention tanks using the HYDRUS-1D model. *Journal of Environmental Management*, v. 217, p. 38-46, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.078>
- LI, J.; ZHAO, R.; LI, Y.; LI, H. Simulation and optimization of layered bioretention facilities by HYDRUS-1D model and response surface methodology. *Journal of Hydrology*, v. 586, 124813, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124813>
- LIU, J.; SAMPLE, D.; BELL, C.; GUAN, Y. Review and research needs of bioretention used for the treatment of urban stormwater. *Water*, v. 6, n. 4, p. 1069-1099, 2014. <https://doi.org/10.3390/w6041069>
- LIU, R.; FASSMAN-BECK, E. Hydrologic response of engineered media in living roofs and bioretention to large rainfalls: experiments and modeling. *Hydrological Processes*, v. 31, n. 3, p. 556-572, 2017. <https://doi.org/10.1002/hyp.11044>
- MASSOUDIEH, A.; MAGHREBI, M.; KAMRANI, B.; NIETCH, C.; TRYBY, M.; AFLAKI, S.; PANGULURI, S. A flexible modeling framework for hydraulic and water quality performance assessment of stormwater green infrastructure. *Environmental Modelling & Software*, v. 92, p. 57-73, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.013>
- MCCUEN, R.H. *Hydrologic analysis and design*. 2ª ed. Nova Jérsei: Prentice Hall, 1998. 814 p.
- MCINTYRE, J.K.; EDMUNDS, R.C.; REDIG, M.G.; MUDROCK, E.M.; DAVIS J.W.; INCARDONA, J.P.; STARK, J.D.; SCHOLZ, N.L. Confirmation of stormwater bioretention treatment effectiveness using molecular indicators of cardiovascular toxicity in developing fish. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 3, p. 1561-1569, 2016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04786>
- MENG, Y.; WANG, H.; CHEN, J.; ZHANG, S. Modelling hydrology of a single bioretention system with HYDRUS-1D. *The Scientific World Journal*, v. 2014, 521047, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/521047>
- MGUNI, P.; HERSLUND, L.; JENSEN, M.B. Sustainable urban drainage systems: examining the potential for green infrastructure-based stormwater management for Sub-Saharan cities. *Natural Hazards*, v. 82, n. 2, p. 241-257, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2309-x>
- MUJOVO, M.J.N. *Simulação de fluxo vertical em trincheiras de infiltração urbana*. 2014. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- NESTINGEN, R.S.; ASLESON, B.C.; GULLIVER, J.S.; HOZALSKI, R.M.; NIEBER, J.L. Laboratory comparison of field infiltrometers. *Journal of Sustainable Water in the Built Environment*, v. 4, n. 3, p. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1061/JSWBAY.0000857>
- NGUYEN, T.T.; NGO, H.H.; GUO, W.; WANG, X.C.; REN, N.; LI, G.; DING, J.; LIANG, H. Implementation of a specific urban water management - Sponge City. *Science of the Total Environment*, v. 652, p. 147-162, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.168>
- ROY-POIRIER, A.; CHAMPAGNE, P.; FILION, Y. Review of bioretention system research and design: past, present, and future. *Journal of Environmental Engineering*, v. 136, n. 9, p. 878-889, 2010. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0000227](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0000227)
- RYCEWICZ-BORECKI, M.; MCLEAN, J.E.; DUPONT, R.R. Nitrogen and phosphorus mass balance, retention and uptake in six plant species grown in stormwater bioretention microcosms. *Ecological Engineering*, v. 99, p. 409-416, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.020>
- SANTOS, P.T.D.S.; SANTOS, S.M.D.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; COUTINHO, A.P.; MOURA, G.S.S.D.; ANTONINO, A.C.D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. *Ambiente Construído*, v. 13, n. 1, p. 161-174, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100011>
- Sartori, A.; LOMBARDI Neto, F.; Genovez, A.M. Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos parte 1: classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 4, p. 5-18, 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrhv10n4.p5-18>

SILVEIRA, A.L.L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v10n1.p5-29>

TRINH, D.H.; CHUI, T.F.M. Assessing the hydrologic restoration of an urbanized area via an integrated distributed hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 12, p. 4789-4801, 2013. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4789-2013>

TUCCI, C.E.M. Inundações e drenagem urbana. In: TUCCI, C.E.M.; BERTON, J.C. (org.). *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 2003, p. 45-150.

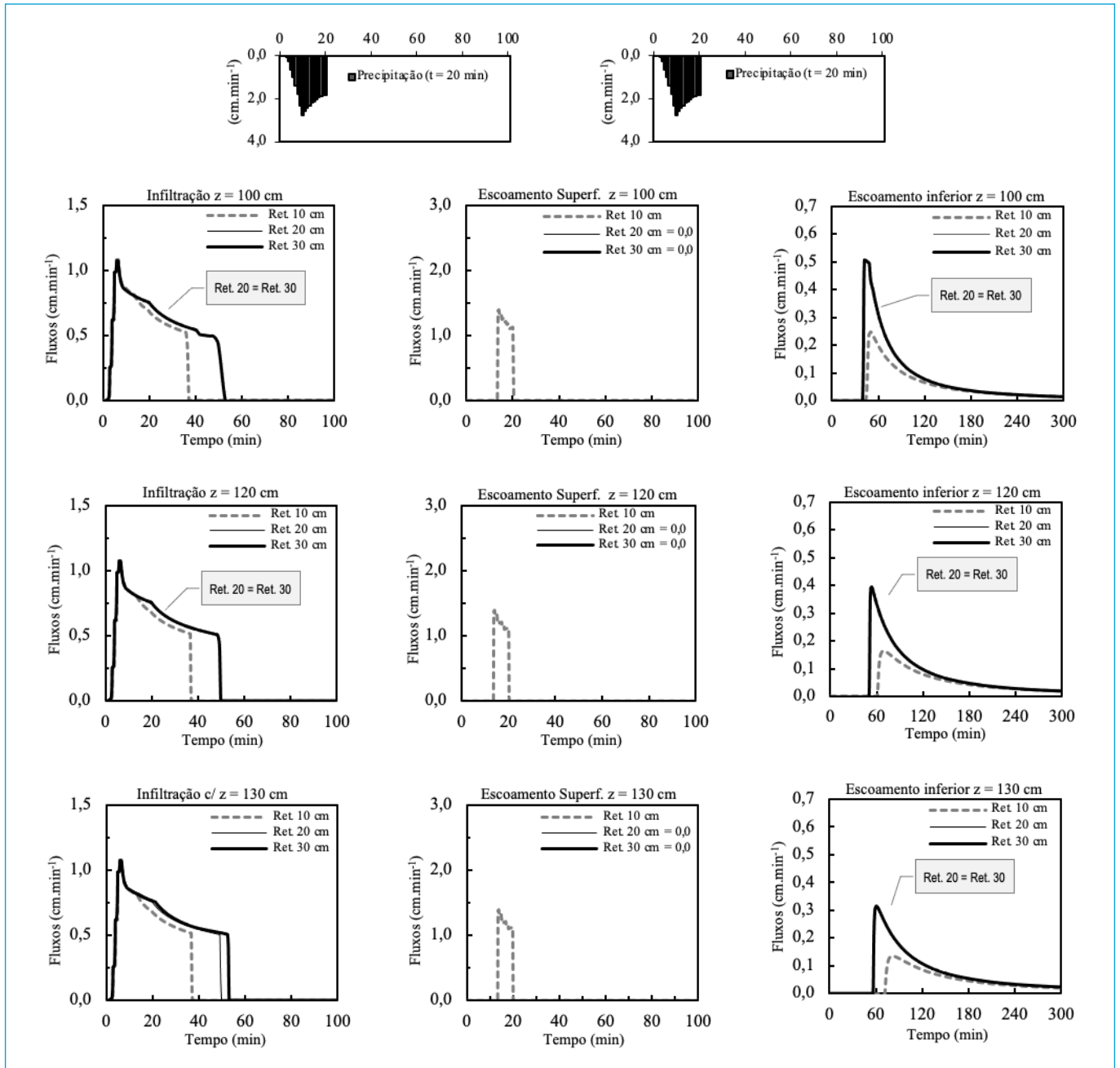
UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). *Urban hydrology of small watersheds*. Technical Release 55 (TR-55). Estados Unidos: USDA, 1986. 164 p. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf. Acesso em: 25 set. 2020.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American*, v. 44, n. 5, p. 892-897, 1980. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

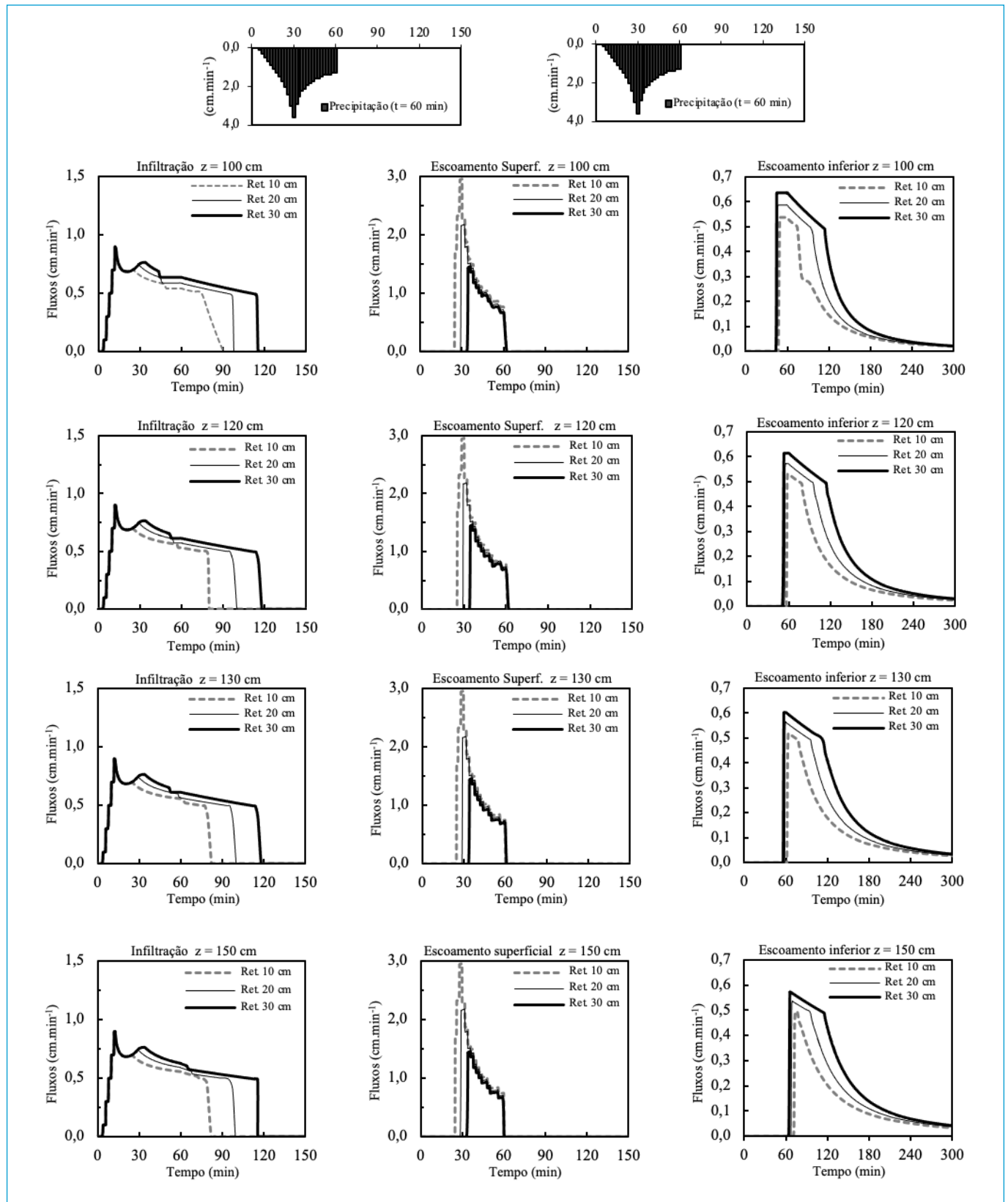
VUOLO, J.H. *Fundamentos da teoria dos erros*. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1996. 249 p.

WINSTON, R.J.; DORSEY, J.D.; HUNT, W.F. Quantifying volume reduction and peak flow mitigation for three bioretention cells in clay soils in northeast Ohio. *Science of the Total Environment*, v. 553, p. 83-95, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.081>

YANG, Y.; CHUI, T.F.M. Optimizing surface and contributing areas of bioretention cells for stormwater runoff quality and quantity management. *Journal of Environmental Management*, v. 206, p. 1090-1103, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.11.064>



Apêndice 1 - Hidrogramas simulados da infiltração, do escoamento superficial e do escoamento inferior para chuva de duração de 20 min.



Apêndice 2 - Hidrogramas simulados da infiltração, do escoamento superficial e do escoamento inferior para chuva de duração de 60 min.