

XV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO HIDROLÓGICO DE UM TELHADO VERDE SUBMETIDO AS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DA REGIÃO METROPOLITANA DO RECIFE.

Camila Barrêto Rique de Barros^{1}; Marco Aurelio Calixto Ribeiro de Holanda¹; Diogo Botelho Correa de Oliveira¹ Ariela Rocha Cavalcanti¹ & Willames de Albuquerque Soares²*

RESUMO – A redução de áreas permeáveis durante o processo de urbanização causa a diminuição no coeficiente de infiltração resultando em um aumento na taxa de escoamento superficial e consequente intensificação na frequência e na magnitude das inundações e alagamentos. Para melhorar os problemas hidrológicos associados a urbanização o uso de telhado verde vem sendo uma alternativa promissora. Nesse sentido, essa pesquisa tem o objetivo de avaliar o comportamento hidrológico dessa técnica durante um período de baixa pluviosidade na Região Metropolitana do Recife (RMR). Para atingir o objetivo proposto foi monitorado um protótipo de telhado verde instalado no município de Olinda-PE durante o período de Agosto a Outubro de 2019 e realizado a simulação do fluxo de água por meio do modelo computacional Hydrus 1D. Analisou-se a capacidade de retenção de água no protótipo durante eventos naturais de chuva, com coleta de dados de umidade inicial do solo e volumes de entrada e saída de água controlados. Durante esse período observou-se uma precipitação total de 73,92 mm que foi completamente retida pelo protótipo de telhado verde. A simulação no Hydrus 1 D mostrou que a variação no volume de água do solo atingiu valores abaixo do ponto de murcha permanente o que levou a morte da vegetação. Também foi verificado a necessidade de elaboração de um sistema de irrigação para os períodos secos.

ABSTRACT–The reduction of permeable areas during the urbanization process causes a decrease in the infiltration coefficient resulting in an increase in the runoff rate and a consequent intensification in the frequency and magnitude of inundation and floods. To improve the hydrological problems associated with urbanization, the use of a green roof has been a promising alternative. In this sense, this research aims to assess the hydrological behavior of this technique during a period of low rainfall in the Metropolitan Region of Recife (RMR). To achieve the proposed objective, a green roof prototype installed in the municipality of Olinda-PE was monitored from August to October 2019 and the water flow simulation was performed using the Hydrus 1D computational model. The capacity of water retention in the prototype was analyzed during natural rain events, with data collection of initial soil moisture and controlled inlet and outlet volumes. During this period, a total precipitation of 73.92 mm was observed, which was completely retained by the green roof prototype. The simulation in Hydrus 1 D showed that the variation in the volume of water in the soil reached values below the permanent withering point led to the vegetation death. There was also a need to develop an irrigation system for dry periods.

Palavras-Chave – Drenagem Urbana, Técnica compensatória, Sustentabilidade.

1) Afiliação: Discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife – PE- CEP: 50.720-001, cbrb_pec@poli.br *(Autor correspondente), macrh_pec@poli.br, dbco_pec@poli.br, pec@poli.br.

2) Afiliação: Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica de Pernambuco, Rua Benfica, 455, Recife – PE, CEP: 50.720-001, was@poli.br.

1 - INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado e não planejado dos centros urbanos causa mudanças significativas no meio ambiente, inclusive no ciclo hidrológico (Martins, 2018). Segundo Salman e Blaustein (2018), as alterações o aumento de áreas impermeáveis durante o processo de urbanização geram um aumento na frequência e na magnitude das inundações e alagamentos.

Uma alternativa de desenvolvimento sustentável que retém e detém o escoamento pluvial, aliviando o problema de inundação urbana consiste no uso de telhados verdes (Mahmoud e Gan, 2018; Zhang *et al.*, 2018). Em sua forma mais simples o sistema construtivo dessas coberturas é composto por vegetação, substrato, filtro, material de drenagem e impermeabilizante. Cada camada que constitui os telhados verdes possuem funções bem definidas e o tipo de cada um deles depende das características da localização onde está inserido. (Vijayaraghavan; Joshi, 2015).

A capacidade de retenção dos telhados verdes está diretamente relacionada com o balanço hidrológico. Segundo Berndtsson (2010) o volume de água retido no telhado verde é evaporado ou utilizado pelas plantas para seu processo de fotossíntese. A combinação desses dois processos é chamada de evapotranspiração. Esse fenômeno é o responsável pela redução do escoamento por essas coberturas.

Conforme Stovin *et al.* (2012) os principais mecanismos hidrológicos que operam dentro do telhado verde são a evapotranspiração, infiltração e armazenamento no substrato e escoamento. Segundo Hilten *et al.* (2008) o escoamento equivale ao excesso de umidade que é drenado pelo telhado verde.

Com isso, uso dessa técnica nas práticas de gestão do sistema de drenagem urbana requer uma predição de suas características hidrológicas, sendo necessário o uso de instrumentos analíticos e ferramentas de modelagem (Carbone *et al.*, 2015). Muitos estudos visaram modelar o comportamento hidrológico de telhados verdes usando modelos numéricos de base física que descrevem o fluxo de água em matriz de solo insaturada, como Software HYDRUS 1D (Hilten *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2016)

Em estudo realizado na Geórgia - EUA, Hilten *et al.* (2008) avaliou a eficácia dos telhados verdes na redução do escoamento pluvial. Para o estudo os autores realizaram simulações no Hydrus 1D para tempestades de projeto de 24 horas para determinar o pico do escoamento, o tempo de e a capacidade de retenção, foi demonstrado que um telhado verde modular com profundidade do substrato de 10 cm fornece retenção completa para tempestades de até 20 mm, proporcionando

detenção para tempestades tão grandes quanto 79,3 mm. Para os autores o Hydrus prevê com precisão o escoamento para pequenos eventos de chuva.

Santos *et al.* (2013) investigou a efetividade dos telhados verdes na redução do escoamento superficial por meio de simulações realizadas no código computacional Hydrus 1D para eventos de precipitação com intensidade de 42 mm/h e 79 mm/h com duração de 30 minutos. Os autores observaram um retardo no início e uma redução no pico do escoamento quando comparado os resultados dos telhados verdes com o convencional, foi concluído também que o modelo Hydrus-1D representou bem a realidade do experimento.

Qin *et al.* (2016) apresentou um modelo de telhado verde para simular a variação de longo prazo da umidade do solo em condições climáticas típicas em Shenzhen, China. Após a calibração e validação com os dados observados de um telhado verde piloto foram realizadas simulações no Hydrus 1D para diferentes sistemas irrigação em telhados verdes. Observou-se que à medida que a profundidade de solo aumenta há uma redução nos dias de estresse hídrico, porém o volume de irrigação cresce. Para os autores uma profundidade da camada de solo de 100 a 150 mm é uma troca razoável entre os objetivos de economizar água e manter a saúde da vegetação do telhado verde.

Assim, os objetivos deste trabalho foram avaliar os componentes do balanço hídrico, especificamente a variação de armazenamento de água do solo, do escoamento e da evapotranspiração, em um protótipo de telhado verde durante um período de baixa precipitação na RMR por meio de simulação no Hydrus 1D e analisar a necessidade de um sistema de irrigação para o período seco.

2 - METODOLOGIA

2.1 Protótipo do telhado verde

Para a realização do estudo foi elaborado um protótipo de telhado verde monitorado durante o período de agosto a outubro de 2019. A implantação e o monitoramento do protótipo foram feitos em uma residência localizada na RMR, no município de Olinda-PE.

Para elaboração do protótipo de telhado verde foi feita uma estrutura de compensado naval com área de 1 m², 20 cm de profundidade e inclinação 2% necessária para conduzir o escoamento para os tubos de drenagem, para garantir a drenagem foram feitos dois orifícios na parte mais baixa da base.

O primeiro passo para a montagem do telhado verde constituiu na instalação da camada impermeabilizante que foi feita com uso de uma lona de polietileno disposta de modo a cobrir toda a área interna da estrutura, em seguida foram instalados flanges de policloreto de vinil (PVC) que funcionaram como drenos, foi disposto 5 cm de argila expandida para camada de drenagem, o bidim, a camada com 9 cm de solo e por fim foram implantados os tapetes de grama esmeralda (*Zoysia Japonica*) com 3 cm de espessura, essas etapas estão apresentadas na Figura 1. O acumulo da água escoada pelo protótipo foi direcionado para dois garrafões de 20 litros por meio de duas mangueiras acopladas aos drenos.



Figura 1 – Montagem do protótipo – (A) camada de impermeabilização, (B) dreno de PVC, (C) camada de drenagem, (D) filtro de Bidim, (E) camada de substrato e (F) camada de vegetação.

2.2 Coleta de dados meteorológico

A coleta de dados pluviométricos foi feita com uso de uma estação meteorológica *Oregon Scientific WMR300*. Essa estação automática contém um modulo de armazenamento, pluviômetro e sensores de temperatura, umidade relativa do ar, direção e velocidade do vento.

A estação foi instalada próximo ao protótipo de telhado verde, com o sensor de velocidade e direção do vento posicionado dois metros acima do protótipo. O Pluviômetro foi instalado junto com o sensor de umidade e temperatura e o transmissor solar ao lado do sensor de velocidade e direção de vento, com 1,5 m acima da superfície do telhado verde, evitando assim a interferência nas leituras, garantido sua precisão.

2.3 Propriedades hidráulicas do solo

Para determinação da umidade residual (θ_r), o parâmetro adimensional de forma (n) e o inverso da pressão de borbulhamento (α) foram usadas as funções de pedotransferência ajustadas por Barros *et al.* (2013) para solos gerais. As variáveis usadas para a estimativa foram os percentuais de areia e

argila obtidos a partir do ensaio de granulometria segundo a NBR 7181 (ABNT, 2016) realizado nos solos do substrato, as frações granulométricas do solo 1 (solo presente no tapete de grama) e do solo 2 (solo usado como suporte para vegetação) podem ser vistos na Tabela 1. A espessura do solo 1 e 2 são 30 mm e 90 mm respectivamente.

Tabela 1 - Composição granulométrica do substrato e do solo.

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
Solo 1	87,9	1,4	10,8
Solo 2	91,5	0,9	7,6

A umidade saturada foi considerada igual a porosidade total, sendo estimada pelo peso específico do solo seco dividido pelo peso específico das partículas, segundo Barros (2013) essa é melhor forma de estima-la. Para determinação do peso específico do solo foi dividido o peso total de solo usado na montagem do protótipo dividido pelo volume ocupado pelo mesmo. O peso específico da partícula de solo foi obtido segundo Embrapa (1996). A condutividade hidráulica foi estimada por meio da equação de Cosby *et al.* (1984).

Com o uso dessas propriedades foi definida a curva de retenção de água dos solos e determinado a capacidade de campo (CC) para uma pressão de -1m e ponto de murcha para pressão de - 150 m para o solo 1 e solo 2. Os parâmetros hidráulicos e o a capacidade de campo e ponto de murcha estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades hidráulicas do solo.

	α (m ⁻¹)	θ_r (m ³ m ⁻³)	θ_s (m ³ m ⁻³)	n (-)	k_s (m.s ⁻¹)	CC	PMP
Solo 1	5,687	0,037	0,392	1,774	$1,936 \cdot 10^{-5}$	0,127	0,0389
Solo 2	6,387	0,020	0,417	1,798	$2,251 \cdot 10^{-5}$	0,108	0,0213

2.4 Modelagem no Hydrus 1D: Dados de entrada e condições de contorno iniciais

A simulação da dinâmica da água no solo pelo modelo Hydrus 1D necessita dos seguintes dados de entrada: dimensões da área em estudo, tempo de simulação, as propriedades hidráulicas do solo e dados atmosféricos. A profundidade do solo foi de 110 mm composto por dois materiais. O tempo de simulação constitui em um período de 55 dias, com dados pluviométricos diários. A evapotranspiração de referência foi estimada pelo método Hargreaves (1994) com uso dos dados meteorológicos obtidos próximo ao telhado verde.

A captação de água pela raiz da cultura utilizada foi considerada, assumindo os parâmetros de Feddes *et al.* (1978) para grama e os dados da cultura constantes com altura de 30 mm e profundidade da raiz de 110 mm. O LAI (Índice de área foliar) foi calculada a partir da altura da cultura usando a formula da grama disponível no Hydrus 1D. A condição de contorno superior adotada foi atmosférica com escoamento superficial e a inferior livre.

A umidade volumétrica dos solos foi medida logo após a montagem do telhado verde e adotadas como condição inicial do solo para modelagem, as umidades iniciais medidas do solo 1 e do solo 2 foram $0,34 \text{ mm}^3\text{mm}^{-3}$ e $0,10 \text{ mm}^3\text{mm}^{-3}$ respectivamente.

3 - RESULTADOS

3.1 Condições climáticas da área de estudo

Durante o período de 27 de agosto a 20 de outubro de 2019 foi observado o comportamento do protótipo de telhado verde submetido ao clima da RMR. No decorrer desse tempo a temperatura mínima obtida, a partir das medições da estação meteorológica instalada próximo ao protótipo, foi de 22°C e máxima de $32,5^\circ\text{C}$. A umidade média atmosférica ficou entre 84,90% e 69,75%. No mês de agosto foi observado as maiores velocidades médias diárias do vento, onde a máxima foi de 8,52 m/s. Segundo Mello *et al.* (2013) esses valores são considerados altos para RMR.

A precipitação acumulada diariamente durante o período ficou abaixo de 7,87 mm. O volume total precipitado durante o período de observação foi de 73,92 mm e foi completamente retido pelo protótipo, não gerando escoamento. Entre os dias 22 de setembro e 10 de outubro foi verificado a morte da vegetação.

3.2 Simulação Hydrus 1D

A umidade entra ou sai do sistema a partir da superfície do solo, através de estômatos vegetais ou através dos drenos. Para os telhados verdes os fluxos de umidade ocorrem por meio da entrada de água no solo pela precipitação, armazenamento no solo devido a capacidade de retenção e saída por evapotranspiração e escoamento (Hilten, 2008). O balanço apresentado pela simulação do telhado verde no Hydrus 1D está apresentado nas Figuras 5 e 6.

A partir da simulação foram calculadas a evapotranspiração potencial pelo método de Hargreaves, e a partir dessa o modelo estimou a evapotranspiração real. O maior valor observado foi

de 3,306 mm no dia 18 de setembro de 2019 e durante o período de 5 a 8 de outubro 2019 a evapotranspiração foi nula.

A precipitação foi medida pela estação meteorológica *Oregon Scientific WMR300* instalada ao lado do protótipo e usada como dado de entrada para o modelo. Para o período de observação não houve escoamento e a evapotranspiração total foi de 77,56 mm enquanto a precipitação chegou a 73,92 mm, ou seja, toda a água que entrou no sistema saiu por meio da evapotranspiração.

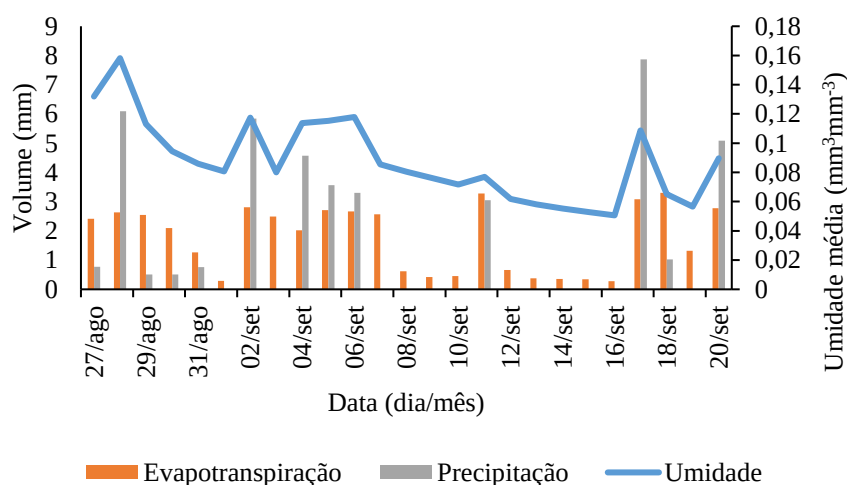


Figura 1- Balanço hídrico para o período de 27 de agosto a 20 de setembro de 2019.

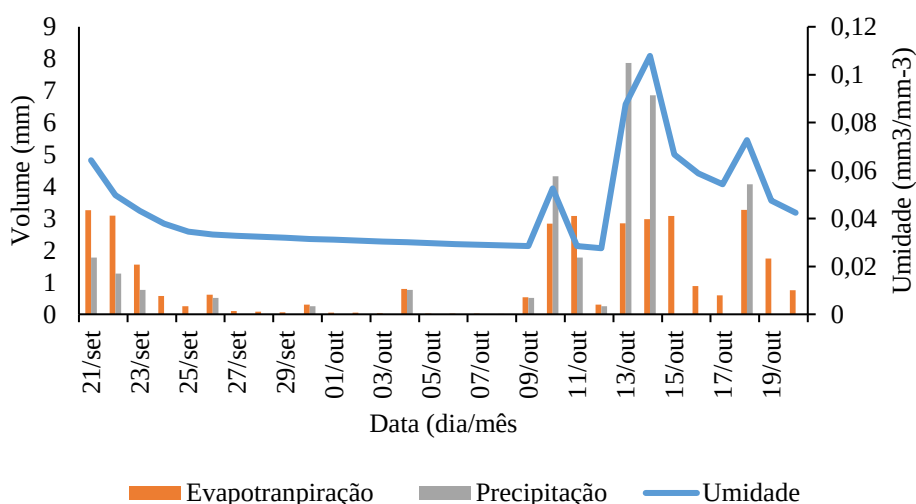


Figura 2 – Balanço hídrico para o período de 21 de setembro a 20 de outubro de 2019.

A variação da umidade média no perfil de solo foi reduzindo ao longo do período avaliado terminado com $0,04 \text{ mm}^3\text{mm}^{-3}$. O comportamento da umidade para a camada de 110 mm do solo, nas profundidades especificadas, está apresentado na Figura 7, as profundidades definidas foram de 0 (superfície), -30 mm referente ao fim da camada de solo 1, -70 mm equivalente ao ponto central da

camada total de solo e -110 mm. De acordo com Mello *et al.* (2007) esses gráficos são importantes para subsidiar as previsões para o escoamento e vazão de pico

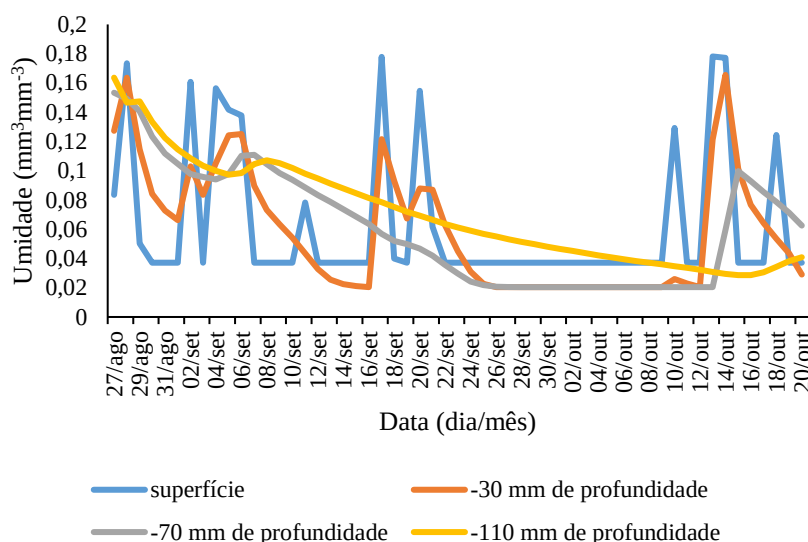


Figura 3 – Umidade no solo durante o período de observação nas profundidades especificadas.

Durante o período de simulação houve uma maior variação na umidade da camada de solo 1, ou seja, os primeiros 30 mm de profundidade. Segundo Schiavon et al. (2013) o sistema radículas das gramas estão concentrados na superfície. Já nas profundidades -70 mm e -110 mm há uma redução gradativa da umidade.

No período de 22 de setembro a 10 de outubro de 2019 a superfície se manteve com a umidade residual do solo, já as profundidades - 30 mm e -70 mm atingiram o ponto de umidade residual no dia 26 de setembro de 2019, a profundidade de -30 mm permaneceu com essa umidade até o dia 10 de outubro enquanto a de -70 mm foi até o dia 13 de outubro de 2019.

Nesse intervalo a precipitação máxima foi de 1,27 mm no dia 22 de setembro de 2019, nesse dia a evapotranspiração foi de 3,092 mm. A saturação não foi observada provavelmente devido à alta condutividade hidráulica evidente em solos arenosos. A falta de saturação indica que não há escoamento (Hilten, 2008).

No período de 22 de setembro a 09 de outubro o substrato do telhado verde esteve abaixo do ponto de murcha permanente (PMP), que para o solo 1 equivale a $0,0389 \text{ mm}^3/\text{mm}^3$ e $0,0213$ para o solo 2, o que levou a cultura implanta ao murchamento irreversível. Segundo Viehmeyer e Hendrickson (1949), a vegetação atinge o murchamento irreversível quando o teor de água no solo alcança o PMP, mesmo em atmosfera saturada com vapor de água.

Segundo Lu et al. (2014) e MacIvor et al. (2013), os telhados verdes são ambientes de crescimento difícil para a vegetação, pois possuem profundidades e volumes médios de crescimento finito. Outro fator que dificulta o desenvolvimento da vegetação nessas coberturas é a limitação de água, tendo em vista que a demanda de água nos telhados verdes dependem exclusivamente da precipitação.

Segundo Ferreira et al. (2013) os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro são os meses com menores índices pluviométricos na RMR, onde a média mensal de precipitação fica abaixo dos 50 mm, corroborando com as baixas precipitações ocorridas durante o período de observação.

CONCLUSÃO

O protótipo de telhado verde mostrou capacidade de retenção de 100% do volume gerado pelos eventos de precipitação ocorridos entre 27 de agosto e 20 de outubro de 2019, não havendo escoamento. Durante esses meses a precipitação máxima foi de 7,87 mm e acumulado de 73,92 mm sendo um intervalo com baixos índices pluviométricos. Além disso foi verificado que a vegetação utilizada chegou ao ponto de murcha irreversível ao final do período.

O balanço hidrológico obtido a partir da simulação no Hydrus 1D mostrou que todo o volume infiltrado foi extraído do solo pela evapotranspiração, não havendo escoamento. Além disso, entre os dias 22 de setembro e 09 de outubro de 2019 o solo se manteve no teor de umidade residual, ou seja, esteve abaixo do ponto de murcha do solo levando a morte da vegetação.

Essas observações mostram o bom desempenho do modelo na simulação balanço hidrológico dos telhados verdes. Outro ponto importante é a demonstração da necessidade de aplicação de um sistema de irrigação durante os períodos de baixa precipitação.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **ABNT NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- BARROS, A. H. C.; LIER, Q. DE J. V.; MAIA, A. DE H. N.; SCARPARE, F. V. (2013). “*Pedotransfer Functions to Estimate Water Rentention Parameters of Soils in Northeastern Brazil*”. Revista Brasileira de Ciências do Solo 37 (2), pp. 379-391.
- BERNDTSSON, J. C. (2010). “*Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review*”. Ecological Engineering 36, pp. 351 – 360.

- CARBONE, M., BRUNETTI, G., PIRO, P., (2015). “*Modelling the hydraulic behaviour of growing media with the explicit finite volume solution*”. Water 7 (2), pp. 568-591.
- COSBY, B.J.; HORNBERGER, G.M.; CLAPP, R.B.; GINN, T.R. (1984). “*A statistical exploration of the relationship of soil moisture characteristics to the physical properties of soils*”. Water Resources Research 20 (6), pp 682–690.
- FERREIRA F. F., TORRES FILHO C. E OLIVEIRA P. R. (2013). “*Previsão Estatística da Precipitação Mensal para a Região Metropolitana do Recife*”. Revista Brasileira de Geografia Física 6 (51517-1528).
- FEDDES, R. A.; KOWALIK, P. J.; ZARADNY, H. (1978). “*Simulation of Field Water Use and Crop Yield*”. John Wiley & Sons.
- HARGREAVES, G. H. (1994). “*Defining and using reference evapotranspiration*”, J. Irrig. Drain. Eng. 120 (6), pp. 1132–113.
- HILTEN, R. N.; LAWRENCE, T. M., TOLLNER, E. W. (2008). “*Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D*”. Journal of Hydrology 358, pp. 288 – 293.
- LU, J., YUAN, J.G., YANG, J.Z., YANG, Z.Y., (2014). “*Responses of morphology and droughttolerance of Sedum lineare to watering regime in green roof system: a rootperspective*”. Urban For. Urban Green 13, pp. 682–688.
- MACIVOR, J.S., MARGOLIS, L., PUNCHER, C.L., CARVER MATTHEWS, B.J. (2013). “*Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs*”. J. Environ.Manag. 130 (1), 297–305.
- MARTINS, L. C. (2018). “*O planejamento da drenagem urbana em cidades médias do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba*”. Sustentabilidade em Debate 9 (2), pp. 120-133.
- MELLO, C.R.; LIMA, J.M.; SILVA, A.M. (2007). “*Simulação do deflúvio e vazão de pico de em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero*”. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola. 11 (4), pp. 410-419.
- MOURA, G. S. S. DE; ANTONINO, A. C. D. (2013).” *Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial*”. Ambiente Construído 13 (1), pp. 161-174.
- QIN A. P.; SANTOS, P. T. DA S.; SANTOS, S. M. DOS; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; PENG YN.; TANGA QL.; YUB SL. (2016). “*A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with awater storage layer*”. Ecological Engineering 95, pp. 399 -408.
- SALMAN I. N. A.; BLAUSTEIN L. (2018). “*Vegetation Cover Drives Arthropod Communities in Mediterranean / Subtropical Green Roof Habitats*”. Sustainability 10 (11), pp. 1-14.
- SANTOS, R. D; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 5.ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; Embrapa-SNLCs, 2005. 92 p.
- SCHIAVON, M., B. LEINAUER, M. SERENA, R. SALLENAVE, AND B. MAIER. (2013). “*Establishing tall fescue and Kentucky bluegrass using subsurface irrigation and saline water*”. Agron. J. 105, pp. 183–190.
- STOVIN, V.; VESUVIANO, G.; KASMIN, H. (2012). “*The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions*”. Journal of Hydrology 414 – 415, pp. 148-161.
- VIEHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. (1949) “*Methods of measuring field capacity and permanent wilting percentage of soils*”. Soil Science (68), pp.75-94.
- VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI U. M. (2015). “*Application of seaweeds substrate additive in green roofs: enhancement of water retention and sorption capacity*”. Landsc Urban Plan 143, pp. 25–32.