



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

YAN RANNY MACHADO GOMES

**TELHADO VERDE EM CLIMA TROPICAL ÚMIDO: investigação da qualidade da
água**

Recife

2019

YAN RANNY MACHADO GOMES

**TELHADO VERDE EM CLIMA TROPICAL ÚMIDO: investigação da qualidade da
água**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientador: Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos.

Recife
2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Josias Machado, CRB-4 / 1690

G633t	<p>Gomes, Yan Ranny Machado Telhado verde em clima tropical úmido: investigação da qualidade da água / Yan Ranny Machado Gomes. – Recife, 2019. 67 f., il., figs., tabs.</p> <p>Orientador: Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019. Inclui Referências.</p> <p>1. Engenharia Civil. 2. Telhados ecológicos. 3. Tecnologia verde. 4. Drenagem urbana. I. Santos, Sylvana Melo dos (orientador). II. Título.</p>
624 CDD (22. ed.)	UFPE BCTG/2019-301

YAN RANNY MACHADO GOMES

**TELHADO VERDE EM CLIMA TROPICAL ÚMIDO: investigação da qualidade da
água**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 31/07/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Sylvana Melo dos Santos (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Leijdane Maria Maciel de Oliveira (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

À minha família, especialmente à minha mãe que me deu todo o suporte para que eu chegasse até aqui.

À orientadora, professora Sylvana pela excelente orientação, seus ensinamentos, oportunidade e confiança em mim depositada.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco – FACEPE – pela bolsa de pós-graduação.

Ao Laboratório de Saneamento Ambiental e Laboratório de Geotecnia, aos técnicos Ronaldo e Gutemberg e à professora Odete pelo suporte para realização de análises desta pesquisa e gentileza.

Aos meus companheiros de pesquisa Camilla, Thomas, Patrícia, Haylla, Yasmim, Maiana, Marcelo. Em especial à Camila que me ajudou em parte das análises de laboratório.

Aos amigos do Grupo de Recursos Hídricos que me escutaram reclamar bastante nesses últimos 2 anos em almoços: Larissa, Ana, Cléber, Jussara, Gabi, Bruno, Gabriel, Marina, Samara, Lívia, Mayara e Rochele. Principalmente aos meus grandes amigos Marcella, Vitor e Lucila por tantos conselhos e paciência em meus momentos de estresse e angústia.

Aos amigos que sempre me deram toda força, incentivo e carinho: Básia, Chrystian, Jônatan, Wallisson, Ana Carolina, Cléber, Laís, Daniel, Douglas, Drika, Ana, Lucien, Thyago, José, Brunna, Thainá, Letícia, Laura, Gedson e Carolina.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

Apesar dos telhados ecológicos (vegetados e não vegetados) fornecerem vários benefícios, eles podem também serem fonte de nutrientes e metais que podem afetar ecossistemas aquáticos a jusante. Dado que Recife possui uma legislação requerendo a instalação de telhados verdes sob condições específicas, este trabalho propõe investigar a qualidade da água de telhados ecológicos em Recife usando espécies locais em um clima tropical úmido. A partir do estudo de quatro células teste de 1 m² (uma não vegetada com argila, duas vegetadas com Coroa-de-Frade e Grama Esmeralda e um telhado de controle) analisaram-se quinze variáveis de qualidade da água a respeito dos parâmetros para irrigação: pH, condutividade elétrica, turbidez, nitrato, amônia, fosfato, bicarbonato, carbonato, cálcio, magnésio, sulfato, potássio, boro, sódio e RAS. Simulamos eventos de chuva com intensidade controlada e analisamos a água da chuva natural. Todos os telhados neutralizaram o pH. Os telhados de controle e de argila expandida foram fontes de bicarbonato de cálcio, sendo eles responsáveis pelos efluentes mais alcalinos. Valores abaixo do limite inferior de quantificação foram observados para carbonato e amônia para todos os telhados. Os telhados verdes foram fontes de nitrato, amônia e boro. Todos os telhados verdes não foram nem fonte nem retiveram cloreto e sulfato. A respeito do experimento com chuva natural, apenas o telhado verde com Coroa-de-Frade excedeu os limites recomendados para irrigação para potássio e fosfato. Um pós-tratamento é necessário para uso dessa água para irrigação sendo recomendado um sistema de descartes de primeiras águas e um filtro de areia com carvão ativado.

Palavras-chave: Telhados ecológicos. Tecnologia verde. Drenagem urbana.

ABSTRACT

Although ecological roofs (vegetated or non-vegetated) provide many benefits, it can also leach substances such as nutrients and metals that can affect downstream aquatic ecosystems. Since Recife has a legislation requiring the installation of green roofs under certain conditions, this work aims to investigate the rainwater quality from ecological roofs in Recife using local species in a tropical and humid climate. Using four test cells of 1m² (one non-vegetated filled with clay roof, two vegetated with Coroa-de-Frade and Gramma Esmeralda and one control roof) we analyzed thirteen water quality variables regarding irrigation parameters: pH, electrical conductivity, turbidity, nitrate, ammonia, phosphate, bicarbonate, carbonate, calcium, magnesium, sulfate, potassium, boron, sodium and SAR (sodium adsorption ratio). We simulated a rain event controlling its intensity and analyzed a natural rainwater. All roofs neutralized the pH, control and clay roofs were source of bicarbonate and calcium, responsible for more alkaline effluents. Below inferior quantification limits were observed for carbonate and ammonia for all roofs. Green roofs were source of NO₃⁻, NH₄⁺ and B⁻. All roofs were neither source or sink for sulphate and chloride for all analysis. Regarding natural rainwater experiment, only green roof with Coroa-de-Frade exceeded the recommend irrigation parameters for potassium and phosphate. A post-treatment is required for irrigation purposes being recommended a first-flush system followed by a filter with sand and activated carbon.

Keywords: Ecological roof Green technology. Urban drainage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um telhado verde.	14
Figura 2 - Precipitação média mensal na cidade de Recife.	29
Figura 3 - Mapa de localização da UETER.	30
Figura 4 - Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife – UETER.....	31
Figura 5 - Coberturas empregadas nas células-teste da UETER.	32
Figura 6 - Desenho esquemático do experimento de simulação de chuva.	33
Figura 7 - Vista superior do experimento de simulação de chuva.....	33
Figura 8 - Hidrômetro utilizado no experimento.....	33
Figura 9 - Manômetro utilizado no experimento	34
Figura 10 - Experimento de checagem de uniformidade de vazão	36
Figura 11 - Regressões Intensidade x Pressão para os telhados estudados.	40
Figura 12 - Resultados do pH.	43
Figura 13 - Resultados da turbidez	44
Figura 14 - Resultados da Condutividade Elétrica.....	45
Figura 15 - Resultados de N-amoniacoal	46
Figura 16 - Resultados de N-nitrato	47
Figura 17 - Resultados de fosfato	48
Figura 18 - Resultados de bicarbonato	50
Figura 19 - Resultados de cloreto	50
Figura 20 - Resultados de cálcio	51
Figura 21 - Resultados de magnésio.....	52
Figura 22 - Resultados de potássio.....	53
Figura 23 - Resultados de sulfato.....	53
Figura 24 - Resultados de boro	54
Figura 25 - Resultados de sódio.....	55
Figura 26 - Resultados de RAS.....	55
Figura 27 - Resultados das amostras instantâneas para as variáveis analisadas	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - parâmetros físico-químicos para avaliar a água para irrigação.....	17
Tabela 2 - Pesquisa sobre qualidade da água nos telhados verdes.....	19
Tabela 3 - Constantes para desagregação de chuva.	26
Tabela 4 - Coeficientes das demais equações IDF para a cidade de Recife	27
Tabela 5 - Valores de intensidade obtidos pela equação IDF de Recife.....	36
Tabela 6 - Metodologias de determinação dos parâmetros de qualidade da água. ..	37
Tabela 7 - Vazões obtidas para diferentes pressões com cinco aspersores.	39
Tabela 8 - Vazões intensidades obtidas em cada telhado.....	40
Tabela 9 - Comparação entre medições de umidade.	56

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	CARACTERÍSTICAS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS.....	14
2.2	BENEFÍCIOS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS	15
2.3	QUALIDADE DA ÁGUA	17
2.3.1	pH.....	18
2.3.2	Nitrogênio e fósforo	18
2.3.3	Carbonato, bicarbonato, cloreto.....	22
2.3.4	Potássio.....	23
2.3.5	Cálcio, magnésio e sódio.....	23
2.3.6	Boro.....	23
2.3.7	Condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais.....	24
2.3.8	Técnicas de melhoria na qualidade da água.....	24
2.4	Chuvas intensas	25
2.4.1	Equações IDF para a cidade de Recife.....	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	DESCRIÇÃO DO LOCAL	29
3.2	CONSTRUÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS (UETER).....	32
3.3	IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA	32
3.4	CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA.....	35
3.5	AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAIS	36
3.6	MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	SIMULAÇÃO DE CHUVA	39

4.2	ANÁLISE DE QUALIDADE DA CHUVA SIMULADA E NATURAL	42
4.2.1	pH.....	42
4.2.2	Turbidez	43
4.2.3	Condutividade Elétrica (CE).....	44
4.2.4	Nitrogênio amoniacal, nitrato e fosfato.....	45
4.2.5	Carbonato, bicarbonato e cloreto.....	48
4.2.6	Cálcio e magnésio	51
4.2.7	Potássio, sulfato e boro	52
4.2.8	Sódio e RAS.....	55
4.2.9	Efeito da umidade antecedente	56
4.3	Análise de qualidade por amostragem instantânea	56
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	59
5.1	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da população e, como consequência, o aumento das superfícies impermeáveis, é capaz de alterar o ciclo hidrológico aumentando o escoamento superficial e diminuindo a capacidade de infiltração e evapotranspiração. Devido ao aumento da impermeabilização do solo, aumenta-se a retenção de energia dando surgimento às ilhas de calor e cresce a ocorrência de pontos de inundação decorridos pela sobrecarga do sistema de drenagem de águas pluviais. Nesse cenário, esses efeitos, atenuados pelas mudanças climáticas, podem ser mitigados através da implementação de tecnologias verdes (GILL *et al.*, 2007) e dentre elas estão os telhados ecológicos. Entre os tipos de telhados ecológicos estão o telhado marrom e o telhado verde. O primeiro é composto por uma camada de substrato nas coberturas dos edifícios.

Os telhados ecológicos são uma ótima solução para diminuir a vazão escoada da chuva devido a parte dessa água ficar retida no solo e ser liberada gradualmente. A diferença entre o telhado marrom e o verde é a ausência de vegetação. Todas as considerações válidas para o substrato do telhado verde também podem ser estendidas à cobertura do telhado marrom.

O telhado verde é um tipo de dispositivo de drenagem na fonte (VERSINI *et al.*, 2015), e são benefícios esperados do seu emprego: conforto térmico resultante do conjunto substrato e vegetação, e consequente economia de energia (LA ROCHE; BERARDI, 2014), redução de ruído (CONNELLY; HODGSON, 2008; CONNELLY; HODGSON, 2013), melhora na qualidade do ar (YANG; YU; GONG, 2008), além do equilíbrio paisagístico e manutenção de habitats naturais para a fauna e flora da região (DUNNETT; NAGASE; HALLAM, 2008).

Apesar dos benefícios citados, não há um consenso quanto à melhora da qualidade da água, especialmente em relação a metais e nutrientes (BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015; WANG; QIN; HU, 2017). Por exemplo, estudos anteriores apontaram o telhado verde como fonte de fósforo (P) e nitrogênio (N) (AITKENHEAD-PETERSON *et al.*, 2011; KARCZMARCZYK; BUS; BARYŁA, 2018). Em especial, no Brasil, por possuir um sistema completamente separado para receber águas pluviais e esgoto, a água da chuva que escoada nas galerias não recebe tratamento antes de ser lançada nos rios. Caso a poluição seja pela presença em excesso de nutrientes

lixiviados, pode resultar na eutrofização de rios (KARCZMARCZYK; BUS; BARYŁA, 2018).

Estudos na região semiárida de Pernambuco apontaram para o comprometimento da qualidade da água após a passagem desta pelo substrato, dificultando seu uso na irrigação de acordo com os padrões recomendados pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (ALMEIDA, 2010). Farias (2012) analisou a qualidade da água de três telhados verdes em Caruaru/PE com diferentes vegetações e identificou-se o aumento de cor, turbidez e nutrientes. Lima (2013) identificou a influência do substrato utilizado na diminuição da qualidade físico-química e bacteriológica, além de encontrar a presença de protozoários e helmintos patogênicos no volume percolado. Silva (2017) estudou duas vegetações típicas do semi-árido e observou que os valores de magnésio, sulfato, fósforo e potássio da água percolada no telhado verde estava muito acima dos valores recomendados para irrigação.

Nesse cenário é importante avaliar a possibilidade de uso da água visando tornar o sistema autossuficiente hidricamente, ou seja, tornar possível que a água escoada seja utilizada para irrigação da vegetação do telhado no período seco.

Em concordância com outros locais do mundo, o Brasil avança na legislação em relação a tecnologias verdes. Cidades como São Vicente, Sorocaba, Curitiba e Caruaru estimulam a implementação dessas práticas aplicando o IPTU Verde, que visa diminuir o IPTU (Imposto Predial e Territorial Urbano) a partir da redução de tributos. Cidades como Guarulhos, São Paulo e João Pessoa possuem leis municipais que obrigam a construção de telhado verde sob certas condições (GUARULHOS, 2012; JOÃO PESSOA, 2013; SÃO PAULO, 2015). Nesse escopo, a cidade de Recife/PE se torna um local potencial para estudo dessa prática visto que a Lei Municipal 18.112/2015 (RECIFE, 2015) torna obrigatória a instalação de telhado verde em edificações habitacionais com mais de quatro andares e não-habitacionais com mais de 400 m² de área coberta. De forma agravante, alguns estudos apontam a necessidade de planejamento urbano e de tecnologias alternativas em Recife, considerando a existência de locais com sérios e recorrentes problemas de alagamentos (SOUZA, 2019), e o aumento na verticalização de prédios (MAGAROTTO *et al.*, 2016).

Sabendo-se que o substrato e a vegetação devem ser escolhidos a partir de condições locais, este trabalho visa estudar o comportamento da qualidade da água em telhados ecológicos instalados em Recife.

1.1 OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa foi caracterizar a qualidade da água escoada de telhados verdes instalados no município de Recife e avaliar a possibilidade de uso da água escoada.

Como objetivos específicos, relacionam-se:

- Avaliar a influência de diferentes substratos e vegetações sobre a qualidade da água escoada dos telhados.
- Comparar os resultados obtidos com os telhados verdes e com o telhado convencional.
- Discutir, para a água de chuva captada pelos telhados verdes, os parâmetros de qualidade da água em relação à norma (s) pertinente (s), bem como os resultados de outras pesquisas.
- Propor usos da água escoada dos telhados, com base nos resultados dos parâmetros investigados.

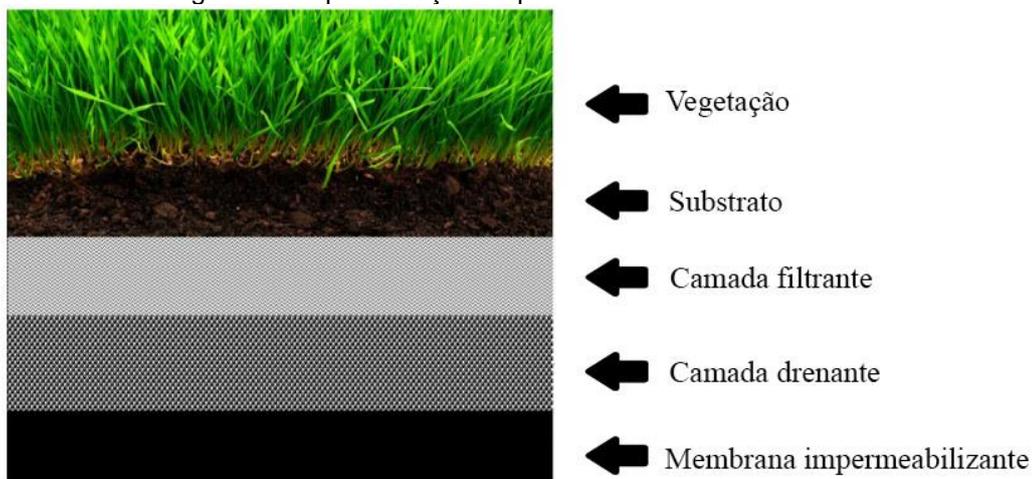
2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados tópicos sobre telhados ecológicos em especial: sobre as características e benefícios dos telhados ecológicos, normas pertinentes a qualidade da água, descrição da importância de algumas das variáveis de qualidade e sobre chuvas intensas.

2.1 CARACTERÍSTICAS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS

O telhado verde consiste na utilização de coberturas vegetais que podem ser implementadas em qualquer tipo de telhado. Geralmente são compostos de cinco camadas: i) Membrana impermeabilizante e de proteção, que tem como objetivo garantir a estanqueidade da laje e garantir que as raízes não causem danos à estrutura; ii) camada drenante, que favorece a drenagem da água infiltrada no telhado; iii) camada filtrante, que impede o carreamento de partículas sólidas para as tubulações; iv) substrato:, que tem a função de fornecer condições para a vegetação se manter, além de reter e armazenar a água precipitada; v) vegetação (HASHEMI; MAHMUD; ASHRAF, 2015).

Figura 1 - Representação esquemática de um telhado verde.



Fonte: Adaptado de Hashemi *et al.* (2015).

A escolha da vegetação depende de diversos fatores. Contudo, Klein e Coffman (2015) reforçaram a importância da utilização de vegetação nativa visando garantir maiores chances de adaptação e sobrevivência das espécies. De acordo com os

autores, neste estudo realizado em Norman, Estados Unidos, as espécies exóticas plantadas nos telhados verdes tiveram maior mortalidade que as nativas devido a condições climáticas extremas. Berardi, Ghaffarian-Hoseini e Ghaffarian-Hoseini (2014) indicaram que, para a escolha da vegetação, os pesquisadores devem considerar em seus estudos: as diferentes camadas de substrato, o clima local e a disponibilidade de água, já que não há um entendimento claro de como essas variáveis afetam o telhado verde.

Os telhados verdes podem ser divididos em dois tipos baseados na profundidade do substrato: o telhado extensivo possui profundidade menor que 15 centímetros, podem ser utilizados em telhados desnivelados e sua principal vantagem é o menor custo de implantação e manutenção (MENTENS; RAES; HERMY, 2006); os telhados intensivos possuem a camada do substrato maior que 15 centímetros, custos mais elevados e requerem um reforço estrutural para suportar maiores cargas, em compensação podem aportar maior diversidade de vegetação com raízes mais profundas e podem ser utilizados para recreação (BERARDI; GHAFFARIAN-HOSEINI; GHAFFARIAN-HOSEINI, 2014).

O telhado marrom funciona sob o mesmo princípio do telhado verde, contudo não possui a camada de vegetação. Possuem benefícios similares aos telhados verdes e não necessitam de manutenção.

2.2 BENEFÍCIOS DOS TELHADOS ECOLÓGICOS

Os telhados verdes conseguem mitigar vários efeitos negativos causados pela urbanização. Entre os principais benefícios dos telhados ecológicos estão: a capacidade de retenção de água como dispositivo de drenagem urbana, a redução dos custos de energia devido à mudança da temperatura interna, a mitigação das ilhas de calor e a redução de ruído. Em relação à quantidade de água que é drenado para fora do substrato, os telhados ecológicos podem reter parte da precipitação através do armazenamento da água no substrato diminuindo o escoamento superficial. Nos telhados verdes um fator adicional é a capacidade de evapotranspiração pela presença da vegetação. A quantidade da água escoada depende de diversos fatores: do tipo da vegetação, da espessura da camada do substrato, do tipo de material drenante, da intensidade da precipitação e da inclinação do telhado (SHAFIQUE; KIM;

RAFIQ, 2018). No semiárido de Pernambuco, o telhado verde contendo Coroa-de-Frade, vegetação cactácea, chegou a atingir 100% de retenção em um período com baixa precipitação (LIMA, 2013), enquanto que Silva (2017) encontrou valores de 75% e 86% para telhados verdes de Babosa e Coroa-de-Frade na mesma região e um retardo de até 21 minutos.

Beecham e Razzaghmanesh (2015) observaram uma retenção de água dos telhados ecológicos entre 51% e 96%, e uma capacidade de retenção nos telhados verdes maior que nos telhados marrons. Carpenter *et al.* (2016) encontraram retenções de aproximadamente 88% com um retardamento do pico de vazão em 30 minutos. Contudo, os telhados verdes são capazes de reter uma grande parcela da precipitação apenas em eventos chuvosos de baixo volume. Os autores analisaram 87 eventos e foi observado uma média de precipitação de 6,1 mm com um desvio padrão de 4,1 mm.

Vários autores constataram que a implementação de telhados verdes reduz o desconforto térmico em comparação com os telhados convencionais (CARDOSO; VECCHIA, 2013; KARACHALIOU; SANTAMOURIS; PANGALOU, 2016; QIN *et al.*, 2013). Berardi, GhaffarianHoseini e GhaffarianHoseini (2014) indicaram que esse fator ocorre devido: ao solo servir como uma massa com alta capacidade térmica e baixa transmissão térmica dinâmica, a absorção térmica das folhas para seu processo de fotossíntese e ao resfriamento induzido pelos processos de evaporação e evapotranspiração da vegetação. Em larga escala, os telhados verdes são capazes de mitigar o efeito das ilhas de calor em centros urbanos (SANTAMOURIS, 2014). Alexandri e Jones (2008) realizaram uma modelagem bidimensional em nove cidades com climas diferentes, e concluíram que quanto mais quente e árido o clima, maior é o efeito da vegetação na temperatura do ar.

Os telhados verdes também possuem potencial de minimização de ruídos, uma vez que a vegetação aumenta a perda de transmissão sonora (PTS), e quanto maior a PTS melhor será a minimização do ruído. Um estudo realizado com telhados verdes constatou um aumento na PTS de 5 para 13 dB em frequências médias e de 2 para 8 dB em frequências altas quando comparado com um telhado convencional (CONNELLY; HODGSON, 2008).

Outro benefício é a remoção de poluentes do ar pelos telhados verdes. Um modelo quantificou que utilizando área de 19,8 ha de telhados verdes há uma remoção

de 52% de ozônio (O₃), 27% de dióxido de nitrogênio (NO₂), 14% de material particulado inferior a 10 micrômetros (PM₁₀) e 7% de dióxido de enxofre (SO₂). Além disso, há o aumento da biodiversidade, visto que os telhados verdes criam *habitats* para diversas espécies (KÖHLER; KSIAZEK-MIKENAS, 2018).

2.3 QUALIDADE DA ÁGUA

A qualidade da água escoada do telhado verde depende do tipo do telhado (espessura da camada de terra, composição do substrato, inclinação do telhado, tipo de vegetação), do regime de precipitação, da manutenção e da composição do ar. Os principais poluentes que impactam negativamente a qualidade da água encontrados nos telhados ecológicos são metais pesados, nitrogênio e fósforo (HASHEMI; MAHMUD; ASHRAF, 2015).

Não existe uma legislação que discuta ou proponha possíveis usos da água drenada do substrato dos telhados verdes. Considerando que, apesar do aporte dos contaminantes, a água escoada tem origem na precipitação, são algumas legislações relacionadas:

- NBR 15.527 (ABNT, 2007), que dispõe sobre os requisitos para aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis como por exemplo bacias sanitárias, irrigação, lavagem de veículos e limpeza de ruas. Estabelece como parâmetros de qualidade as variáveis coliformes totais e fecais, cloro residual livre, turbidez, cor aparente e pH;
- NBR 13.969 (ABNT, 1997), com tema: taques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos;
- Portaria do Ministério da Saúde 2.914 (BRASIL, 2011), que estabelece os padrões de qualidade da água de potabilidade; e
- Publicação da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (ALMEIDA, 2010), que fornece diretrizes sobre os padrões da qualidade da água para irrigação considerando os parâmetros apresentados na
- Tabela 1.

Tabela 1 - parâmetros físico-químicos para avaliar a água para irrigação.

Variável de qualidade	Símbolo	Intervalo
Condutividade Elétrica	CE	0-3 dS m ⁻¹
Cálcio	Ca ⁺²	0-2000 mg L ⁻¹
Magnésio	Mg ⁺²	0-20 meq L ⁻¹

Variável de qualidade	Símbolo	Intervalo
Sódio	Na ⁺	0-40 meq L ⁻¹
Carbonatos	CO ₃ ⁻²	0-0,1 meq L ⁻¹
Bicarbonatos	HCO ₃ ⁻	0-10 meq L ⁻¹
Cloretos	Cl ⁻	0-30 meq L ⁻¹
Sulfatos	SO ₄ ⁻²	0-20 meq L ⁻¹
Nitrogênio-Nitrato	N – NO ₃ ⁻	0-10 mg L ⁻¹
Nitrogênio-Amoníaco	N – NH ₄ ⁺	0-5 mg L ⁻¹
Fósforo-Fosfato	P – PO ₄ ⁻³	0-2 mg L ⁻¹
Potássio	K ⁺	0-2 mg L ⁻¹
Boro	B ⁺³	0-2 mg L ⁻¹
Acidez ou Alcalinidade	pH	6-8,5
Razão de Adsorção de Sódio	RAS	(0 – 15 mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}

Legenda: dS m⁻¹ = deciSiemes por metro (SI); mg L⁻¹ = miligrama por litro = parte por milhão (ppm); meq L⁻¹ = mili equivalente por litro (multiplica-se pelo peso químico equivalente dos íons para obter mg L⁻¹).

Fonte: Adaptado de Almeida (2010).

2.3.1 pH

Valores extremos de pH influenciam na disponibilidade de nutrientes para absorção das plantas e pode acarretar num aumento da presença de minerais nocivos às plantas. Já foi constatado que a diminuição do pH do solo, pode acarretar no processo de dessorção, ou seja, desprendimento das moléculas da superfície do grão de solo, (BANG; HESTERBERG, 2004; SUKREEYAPONGSE *et al.*, 2002) e, conseqüentemente, ocorrer lixiviação dos metais pesados.

2.3.2 Nitrogênio e fósforo

Uma atenção maior precisa ser dada aos nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, por fazerem parte dos principais contaminantes responsáveis por diminuir a qualidade da água. Estudos indicam que pode haver tanto aumento quanto diminuição nas concentrações de nitrogênio e fósforo em telhados ecológicos (WANG; QIN; HU, 2017.). Em excesso, os nutrientes podem ser lixiviados até os rios e causar o processo de eutrofização. Com isso, há o crescimento exacerbado de matéria orgânica, principalmente de algas, reduzindo o teor de oxigênio dissolvido. As concentrações de nitrogênio e fósforo da água escoada de telhados verdes se dão principalmente pelo tipo do substrato, tempo de construção (idade do telhado) e ao uso de fertilizantes (BERNDTSSON, 2010). O fósforo é liberado, em sua maioria sob a forma de fosfato e o nitrogênio na forma de nitrato e amônia (AITKENHEAD-PETERSON *et al.*, 2011;

BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015; BERNDTSSON; EMILSSON; BENGTTSSON, 2006; BUFFAM; MITCHELL; DURTSCHHE, 2016).

As concentrações variam muito a depender do conjunto substrato e vegetação. Karczmarczyk, Bus e Baryła (2018) avaliaram a capacidade de lixiviação de fosfato simulando a precipitação utilizando água do sistema de abastecimento, sendo que dos 44 eventos simulados, 11 estavam poluídos com fosfatos. A concentração média de $P - PO_4^{-3}$ da chuva simulada foi de 0,035 mg/L. Utilizando 5 combinações de substrato e vegetação os valores a jusante do telhado variaram de 0 a 3,169 mg/L. Ferrans *et al.* (2018) compararam telhados verdes com de controle e encontraram diferenças de 7,41 mg/L-N para nitrato, -0,12 mg/L-N para nitrogênio amoniacal e 5,03 mg/L-P para fosfato.

Substratos artificiais têm a capacidade de diminuir a lixiviação de nutrientes pelo potencial poder de absorção e adsorção. O biocarvão, material produzido da biomassa através do processo de pirólise (uma reação ocorrida em altas temperaturas), consegue reduzir as cargas de nitrogênio e fósforo em relação a telhados verdes com substrato sem o biocarvão (KUOPPAMÄKI; LEHVÄVIRTA, 2016) e aumentar a retenção de água no substrato, entretanto eles devem ser estudados com cuidado, pois devido às suas propriedades variáveis, eles podem ter o efeito inverso, ou seja, aumentar as concentrações de nutrientes a jusante (KUOPPAMÄKI *et al.*, 2016). A adição de substâncias como vidro reciclado, cerâmica ou fibra reciclada ao substrato também foram estudadas para reduzir a lixiviação de nutrientes pela sua maior porosidade e, conseqüentemente, aumentando o poder de absorção (CHEN; KANG; LIN, 2018).

Tabela 2 - Pesquisa sobre qualidade da água nos telhados verdes.

Referência	Local	Variáveis analisadas	Clima	Principais resultados
Buffam; Mitchell; Durtsche (2016)	Cincinnati, Estados Unidos	PO_4^{-3} , NH_4^+ , NO_3^- , Al^{+3} , Ca^{+2} , Fe , Mg^{+2} , PT, NT, K^+ , Na^+ , Sr, Zn^{+2} ; COD	Transição subtropical úmido e continental úmido	A água escoada em telhados verdes recém construídos com altas concentrações de substâncias bioativas (C, P e N). Qualidade da água com alta variabilidade sazonal.

Referência	Local	Variáveis analisadas	Clima	Principais resultados
Beecham; Razzaghmanesh (2015)	Adelaide, Austrália	pH, turbidez, CE, SDT, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ , Na^+ , Mg^{+2} , Ca^{+2}	Quente Mediterrâneo	Telhados verdes e marrons comparados e serviram como fonte de poluentes. Telhados verdes intensivos com melhor qualidade da água que os extensivos. Comportamento oposto dos telhados marrons.
Carpenter <i>et al.</i> (2016)	Syracuse, Estados Unidos	COD, NT, PT	Continental úmido	Retenção de nutrientes relacionada com a retenção de água dos telhados verdes, especialmente na temporada de crescimento das plantas. Reteve COD.
Todorov <i>et al.</i> (2018)	Syracuse, Estados Unidos	pH, COD, CID; Cl^- ; SO_4^{-2} , NO_3^- , PO_4^{-3} , NH_4^+ , NT, Na^+	Continental úmido	Telhados verdes extensivos (por 4 anos): NO_3^- , PO_4^{-3} e SO_4^{-2} lixiviados no primeiro ano, e estabilizados no terceiro ano. Parâmetros (exceto fósforo) atenderam aos padrões da USEPA (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos).
Vijayaraghavan; Joshi (2014)	Chennai, Índia	pH, CE, SDT, Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al, Fe, Cr, Cu, Cd, Ni, Pb e Zn^{+2}	Tropical	Telhados verdes aumentaram o pH da água e retiveram os metais, devido ao poder de sorção do substrato.

Referência	Local	Variáveis analisadas	Clima	Principais resultados
Ferrans <i>et al.</i> (2018)	Bogotá, Colômbia	NT, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , PT, PO ₄ ⁻³ , pH, SDT, SST, cor, Tu, DBO, DQO, CT; Zn, Cu, Ni, Pb, Se, Al, Ba, B, Ca ⁺² , Sr, Fe, Li, Mg ⁺² , Mn, K ⁺ , Na ⁺ , HP	Subtropical	Com exceção do pH (concentração abaixo do limite detectável), NH ₄ ⁺ , SST, Se e Li, todas as demais variáveis aumentaram as concentrações após passagem pelo telhado verde. O tipo do substrato, intensidade do evento chuvoso e o regime de chuva foram variáveis relevantes com relação a qualidade da água.
Zhang <i>et al.</i> (2015)	Chongqing, China	pH, Cu, Pb, Zn, Fe, Mn, Al, K ⁺ , Ca ⁺² , Si ⁺⁴ , F ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ⁻² DBO, DQO, NT, PT, NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺ , SST, COT	Subtropical (monção)	Redução das concentrações de NH ₄ ⁺ , aumento de NO ₃ ⁻ , K ⁺ , Si ⁺⁴ , COT e Al após a passagem pelo substrato.
Chai <i>et al.</i> (2018)	Shenzhen, China	SST, DQO, NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻ , NT, PT	Subtropical (marítimo)	Ao longo de 3 anos de estudo, as concentrações de SST, DQO e NH ₄ ⁺ aumentaram, de NO ₃ ⁻ diminuiu, NT e PT não variaram.
Pęczkowski <i>et al.</i> (2018)	Breslávia, Polônia	CE, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₄ ⁺ , PO ₄ ⁻³ , NT, PT	Continental úmido	Substratos compostos por pedrapome e zeólita. Compostos de nitrogênio e fósforo aumentaram após a água da chuva.
Farias (2012)	Caruaru, Brasil	Cor, Tu, Temp, pH, Alc, Dur, Cl ⁻ , Fe, N, P, OD	Semiárido	A água escoada dos telhados verdes necessita de tratamento de amônia, fosfato e nitrato para sua utilização para irrigação. Possível uso da água para fins não potáveis após tratamento de remoção de cor e ST para os parâmetros analisados.

Referência	Local	Variáveis analisadas	Clima	Principais resultados
Lima (2013)	Caruaru, Brasil	OD, temp, pH, CE, Sal, Tu, cor, Alc, ST, Cl^- , Dur, Fe, P, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , E. coli, Coli Tot	Semiárido	Grande influência do substrato na qualidade da água. Variáveis de qualidade não se adequaram aos parâmetros recomendados para irrigação e reuso não potável.
Silva (2017)	Caruaru, Brasil	CE, SDT, Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{-2} , NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{-3} , B, K^+ , pH, RAS, HCO_3^- , CO_3^{-2}	Semiárido	O desempenho de um filtro de areia com carvão ativado como tratamento de águas de telhado verdes. O filtro apresentou remoção em todos os parâmetros analisados com exceção de Boro com maiores reduções para SO_4^{-2} , CE, Cl^- e PO_4^{-3} .

PO_4^{-3} : fosfato; NH_4^+ : amônia; NO_3^- : nitrato; NO_2^- : nitrito; Al: alumínio; Ca^{+2} : cálcio; Fe: ferro; Mg^{+2} : magnésio; PT: fósforo total; NT: nitrogênio total; K^+ : potássio; Na^+ : sódio; Sr^{+2} : estrôncio; Zn^{+2} : zinco; COD: carbono orgânico dissolvido; CID: carbono inorgânico dissolvido; CE: condutividade elétrica; SDT: sólidos dissolvidos totais; ST: sólidos totais; SO_4^{-2} : sulfato; Cl^- : cloreto; SDT: sólidos dissolvidos totais; SST: sólidos suspensos totais; DBO: demanda bioquímica de oxigênio; demanda química de oxigênio; Pb: chumbo, Se: selênio, Ba: bário, B: boro, Sr: estrôncio, Li: lítio, Mn: manganês, HP: hidrocarbonetos poliaromáticos; Si^{+4} : silicato; F^- : fluoreto; Cl^- : cloreto; COT: carbono orgânico total; CT: coliformes totais; Tu: turbidez; Sal: salinidade; temp: Temperatura; Alc: alcalinidade; Dur: dureza; E. coli: *Escherichia coli*; Coli Tot: Coliformes totais; RAS: razão de adsorção de sódio; HCO_3^- : bicarbonato; CO_3^{-2} : carbonato.

Fonte: O autor (2019).

2.3.3 Carbonato, bicarbonato, cloreto

A dureza na água pode ser dividida em temporária e permanente. A dureza temporária está ligada a carbonatos e bicarbonatos. Em altas concentrações, esses íons são responsáveis por incrustar tubulações a partir da formação de compostos insolúveis podendo dificultar ou impedir a passagem de água em sistemas de irrigação.

Entre os elementos responsáveis pela dureza temporária está o cloreto. Segundo Ayers e Westcot (1999), o cloreto não é adsorvido pelas partículas do solo se deslocando juntamente com a água, porém é absorvido pelas plantas e se acumulando nas folhas pelo processo de transpiração. Ainda, o cloreto é também

responsável pela causa da salinidade e, em casos de concentrações muito elevadas, causa necroses e queimadura nas folhas (ALMEIDA, 2010).

2.3.4 Potássio

Embora geralmente se apresente em concentrações pequenas para água de irrigação, o íon potássio, caso se apresente em altas concentrações, pode acarretar na indisponibilidade de magnésio para as plantas. Caso haja excesso de cálcio no solo, há inibição da absorção de potássio pelas plantas. O potássio regula a perda de água das plantas, regulam a permeabilidade das membranas, controlam o pH da vegetação e influenciam na síntese de proteínas (MALAVOLTA, 1997).

2.3.5 Cálcio, magnésio e sódio

Concentrações altas de salinidade (indicado pelas altas concentrações de condutividade elétrica, Ca^{+2} , Mg^{+2} e Na^{+} , entre outros íons) podem restringir o crescimento das plantas pela diminuição da capacidade de absorção de água e é perceptível pela queimadura nas folhas. Deve também evitar a presença de cálcio juntamente com o sulfato, pois ambos reagem dando origem a precipitados que as tubulações e aspersores.

Quando a água apresenta alta concentração de sódio em relação a cálcio e magnésio há ocorrência do solo sódico. Nesse caso, há a indução de trocas de íons cálcio e magnésio pelos de sódio nos solos, degradando e diminuindo a condutividade hidráulica do solo (CORDEIRO, 1983). Para avaliação da sodicidade utiliza-se a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) e é indicado pela Equação 1, sendo os valores expressos em $(\text{mmol}_c\text{L}^{-1})^{1/2}$ (ALMEIDA, 2010).

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^{+}}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2}}{2}}} \quad (1)$$

Onde Na^{+} é a concentração de sódio, Ca^{+2} a concentração de cálcio e Mg^{+2} a concentração de magnésio.

2.3.6 Boro

O boro também é comumente presente em maiores níveis em águas salinas. Apesar de ser um micronutriente essencial para o crescimento das plantas, possui uma concentração ótima muito baixa e possui intervalo entre o máximo e mínimo tolerado muito pequeno (GUPTA *et al.*, 1985). A ocorrência de toxicidade por Boro causa o amarelado nas folhas e o aparecimento de manchas (ALMEIDA, 2010).

2.3.7 Condutividade elétrica e sólidos dissolvidos totais

A condutividade elétrica é a capacidade da água em conduzir corrente elétrica e está associada com a concentração total de sais dissolvidos presentes na água. Principalmente, os íons que contribuem para a presença de alta condutividade elétrica são: sódio, potássio, bicarbonato, sulfato e cloreto.

Os sólidos dissolvidos totais (SDT) são partículas que não são capazes de passar em um filtro de 2 μm . A condutividade elétrica representa a facilidade ou dificuldade de passagem da eletricidade na água, sendo esta uma medida indireta da salinidade (APHA, 2005). Os SDT e a condutividade possuem uma correlação positiva linear a partir de um coeficiente K (Equação 2) que geralmente variam entre 0,5 e 0,75 a depender da salinidade e composição da água (WALTON, 1989) e está em concordância com estudos mais recentes (ALI; MO; KIM, 2012; MCNEIL; COX, 2000).

$$EC(\text{dS/m}) \times K = \text{SDT (mg/L)} \quad (2)$$

Os SDT são divididos em voláteis e fixos. Os voláteis são constituídos pela parcela orgânica que se volatiliza a uma temperatura de 550 °C. A fração restante é composta por matéria inorgânica. A presença de SDT também está correlacionada positivamente com a turbidez, que tem relação com a transparência do líquido devido à presença de materiais que interferem com a passagem da luz através do fluido.

2.3.8 Técnicas de melhoria na qualidade da água

A presença de barreiras físicas e as condições de armazenamento, a fim de evitar contaminações é um fator importante para a qualidade da água. Silva *et al.* (2017), com base em resultados de parâmetros físico-químicos e microrganismos patogênicos desviada do sistema de armazenamento, com o emprego de 3 tipos de

dispositivos de descarte automático: um baseado no princípio de fecho hídrico, um baseado no princípio dos vasos comunicantes e um baseado em ambos os princípios físicos, destacam a importância do desvio das primeiras águas de chuva.

Carvalho *et al.* (2018) avaliaram a eficiência de um dispositivo automático de desvio de primeiras águas de baixo custo, o DesviUFPE. A partir de teste em uma zona rural do nordeste brasileiro identificaram uma remoção de 98% e 100% de coliforme total e *Escherichia coli*, respectivamente e as variáveis de turbidez e cor se adequaram aos parâmetros para água potável. Dispositivos filtros também podem ser utilizados para melhoria da qualidade da água como em Silva (2017), que estudou dois filtros com areia em diferentes granulometrias associado com carvão ativado comercial e encontrou resultados satisfatórios de remoção para várias variáveis de qualidade da água (Tabela 2).

2.4 Chuvas intensas

As intensidades máximas de precipitações são de grande importância para o dimensionamento de obras de engenharia, especialmente para projetos de drenagem urbana. Tais precipitações são obtidas através de relações Intensidade-Duração-Frequência – IDF onde é possível estimar a vazão de projeto associando a intensidade máxima da precipitação a uma determinada duração da chuva.

Para determinação da curva IDF avalia-se a frequência de ocorrências de eventos que podem ser igualados ou superados a partir de uma distribuição de probabilidades. Essa distribuição é ajustada para uma série de precipitações máximas anuais de longa duração e que permite extrapolação para realizar inferências. Essas frequências estão relacionadas com o tempo de recorrência do evento de determinada magnitude. O tempo de recorrência é o tempo médio esperado para que o evento volte a ocorrer. Para obras de microdrenagem urbana os tempos de retorno mais utilizados são de até 10 anos (TUCCI, 2001).

Entre as distribuições de extremos mais aplicadas em hidrologia estão Gumbel, Weibull e Fréchet que relacionam probabilidade de ocorrência e magnitude (KATZ et al. 2002). A grande diferença entre elas está no sinal do parâmetro de forma o qual define a inclinação da calda superior da distribuição de probabilidade.

Para estimar os parâmetros alguns métodos estão disponíveis, entre os mais utilizados estão o método dos momentos, o de máxima verossimilhança e o de momentos-L (NAGHETTINI E PINTO, 2007).

O método dos momentos se utiliza dos momentos estatísticos para definição dos parâmetros. Devido a algumas restrições foi desenvolvido o método dos Momentos-L, adaptação do método dos momentos que traz mais robustez, especialmente quando se tem amostras com tamanho pequeno por se utilizar de uma combinação linear dos momentos amostrais (HOSKING *et al.*, 1985). O método da Máxima Verossimilhança se baseia em resolver um sistema de equações que maximizam a função verossimilhança. Para verificar o ajuste das estimativas testes de aderência, o de Kolmogorov-Smirnov pode ser utilizado (NAGHETTINI E PINTO, 2007).

Com a distribuição ajustada, a determinação da precipitação máxima para diferentes durações (e.g. 24h, 12h, 10h ...) pode ser realizada a partir do método de desagregação de chuvas (CETESB, 1986) a partir de sucessivas multiplicações de constantes a precipitação diária a depender da duração da chuva desagregada desejada. As constantes de conversão são mostradas na

Tabela 3.

Tabela 3 - Constantes para desagregação de chuva.

Relação (t1/t2)	Constante (k)
5min/30min	0,34
10min/30min	0,54
15min/30min	0,7
20min/30min	0,81
25min/30min	0,91
30min/1h	0,74
1h/24h	0,42
6h/24h	0,72
8h/24h	0,78
10h/24h	0,82
12h/24h	0,85
1dia/24h	1,14

Fonte: Adaptado de CETESB (1986).

A partir dos valores encontrados pela desagregação os coeficientes da equação IDF (Equação 3; TUCCI, 2001) podem ser obtidos utilizando métodos como o de mínimos quadrados linear ou não linear.

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} \quad (3)$$

Tal que i é a intensidade de precipitação, T o tempo de recorrência, t a duração da chuva em minutos, a , b , c e d são parâmetros adimensionais que descrevem características do local.

2.4.1 Equações IDF para a cidade de Recife

A partir de dados observados dos postos Olinda e Curado com registros históricos entre 1926 e 1977 foram calculadas equações de chuvas intensas para a cidade pela EMCIBRA. Sendo que a equação calculada pela EMCIBRA S.A. Engenharia de Consultoria sendo especificamente para Recife e pela Acqua-Plan referindo-se a Região Metropolitana de Recife (EMCIBRA, 1978 *apud* COUTINHO *et al.*, 2013). A equação elaborada pela Emcibra pela é a Equação 4:

$$i = \frac{335,47 \cdot T^{0,2180}}{(t + 4)^{0,589}} \quad (4)$$

Já a equação calculada pela Acqua-Plan utiliza-se o valor máximo entre as duas expressões (5) e (6):

$$i_1 = \frac{456,768 \cdot (T - 15)^{0,117} \cdot (1 - 4,54 \cdot 10^{-21} \cdot t^8)}{(t + 6)^{0,5811}} \quad (5)$$

$$i_2 = \frac{72,153 \cdot (T - 1,75)^{0,178}}{(t + 1)^{0,7492}} \quad (6)$$

Equações foram geradas por outros autores e seus coeficientes relacionam-se na Tabela 4 de acordo com o modelo tradicional apresentado na equação 3.

Tabela 4 - Coeficientes das demais equações IDF para a cidade de Recife

Referência	a	b	c	d
Ramos e Azevedo (2010)	1423,97	0,1124	21	0,7721
Coutinho et al. (2010)	362,7199	0,2129	4,1218	0,5824
Silva e Araújo (2013)	1380,2176	0,19369	22	0,78201

Fonte: O Autor (2019).

O novo plano diretor Diretor de Drenagem Urbana de Recife no ano de 2016 (estabeleceu uma nova equação de chuva intensas (Equação 7)

$$i = \frac{611,3425 \cdot T^{0,1671}}{(t + 7,3069)^{0,6348}} \quad (7)$$

Em todas as equações acima citadas i é a intensidade da chuva em mm/h, T é o tempo de retorno em anos e t a duração da chuva em minutos.

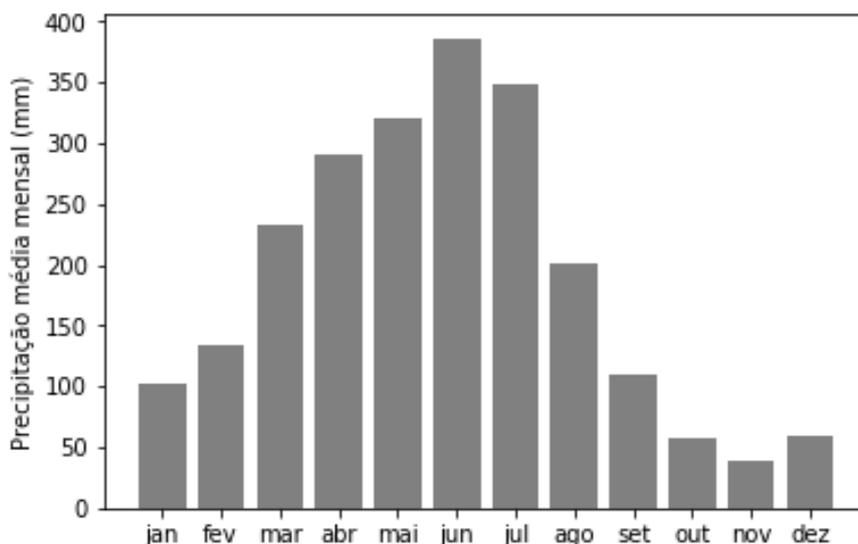
3 METODOLOGIA

Neste tópico está descrito: a descrição do local de estudo e das unidades experimentais de telhados ecológicos, construção e calibração do sistema de simulação de chuva e análises realizadas.

3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL

A cidade de Recife é capital do estado de Pernambuco, no nordeste brasileiro. Recife possui um clima tropical úmido com ocorrência do período chuvoso nos meses de abril a julho (Figura 2). Considerando uma série histórica diária de março de 1961 a junho de 2016 (apenas 18 dias com dados faltantes) da estação pluviométrica Recife - Curado (código 834007) disponível na plataforma Hidroweb da Agência Nacional de Águas - ANA (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>), observou-se que a precipitação média anual em Recife foi de 2278 mm. Pela estação meteorológica mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da unidade de Recife, bairro do Curado (código 82900), a temperatura do ar média local é de 25,5 °C, e a umidade relativa do ar média de 79,8%.

Figura 2 - Precipitação média mensal na cidade de Recife.



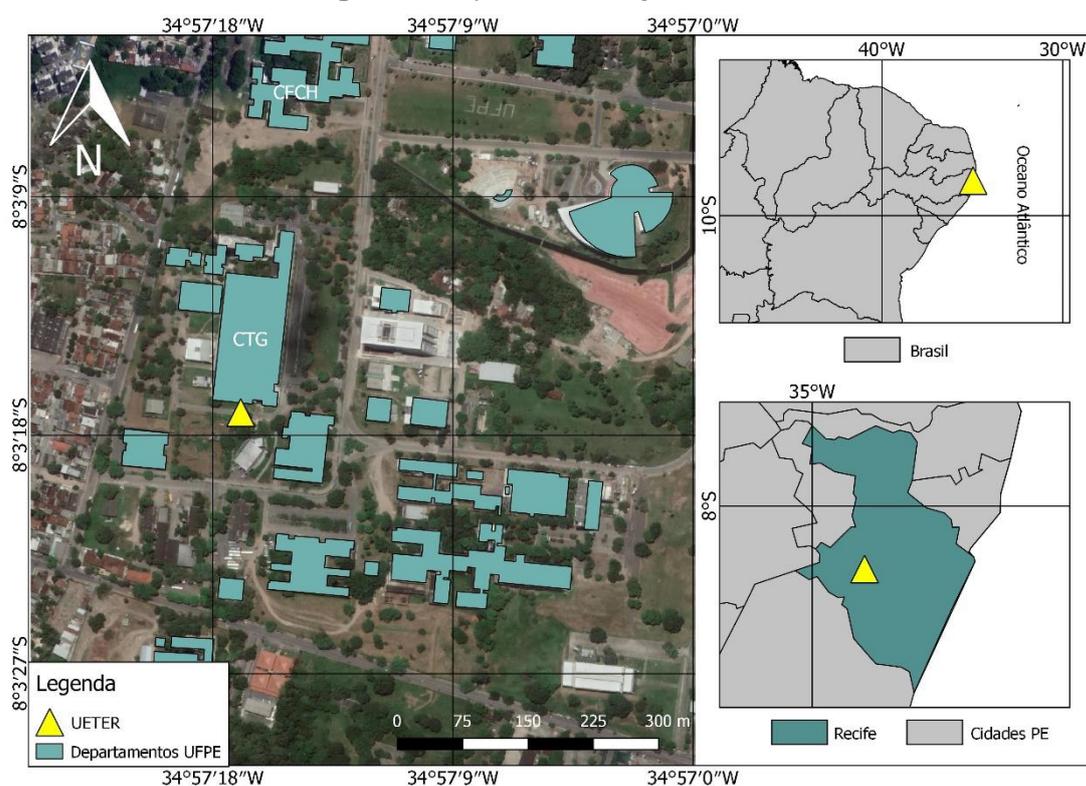
Fonte: Hidroweb, estação 834007 (2019).

Para realização desta pesquisa foram utilizadas o cinco células-teste que compõem a Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife (UETER). A UETER está localizada no *campus* de Recife da Universidade Federal de

Pernambuco (UFPE, Figura 3) nas coordenadas Lat-Long: 8,0549° S e 34,9527° W. As células-teste que compõem a UETER foram implantadas na área experimental que fica ao lado do Laboratório de Hidráulica do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da UFPE, Figura 4.

. As construções medem 1,30 m x 1,30 m x 2,75 m (comprimento, largura e altura) e possuem uma área útil de cobertura de 1 m², elas se distanciam de aproximadamente 1 m, e entre elas foram construídas bases para apoio dos reservatórios para coleta da água escoada no telhado.

Figura 3 - Mapa de localização da UETER.



Fonte: O autor (2019).

Figura 4 - Unidade Experimental de Telhados Ecológicos de Recife – UETER.



Fonte: o autor (2019).

Para investigação da qualidade da água escoada das coberturas, foram implantados sobre as lajes impermeabilizadas das células-teste da UETER as seguintes coberturas:

- Um telhado marrom, em que foi utilizado argila expandida como cobertura (Figura 5a);
- Dois telhados verdes extensivos, sendo um coberto com substrato e grama Esmeralda (Figura 5b) e o outro coberto com substrato e cactos Coroa-de-Frade (Figura 5c)
- Dois telhados controle, sem coberturas adicionadas sobre a laje impermeabilizada (Figura 5d).

Para escolha das espécies das vegetações foi considerado: (1) emprego em projetos paisagísticos e de jardinagem e (2) capacidade de resistência a longos períodos de estiagem. Assim sendo, foi selecionada a grama Esmeralda em atendimento ao primeiro critério, e o cacto Coroa-de-Frade em atendimento ao segundo critério. Além disso, ambas as espécies já foram estudadas por trabalhos anteriores deste grupo de pesquisa (FARIAS, 2012; LIMA, 2013; SILVA, 2017).

Figura 5 - Coberturas empregadas nas células-teste da UETER.



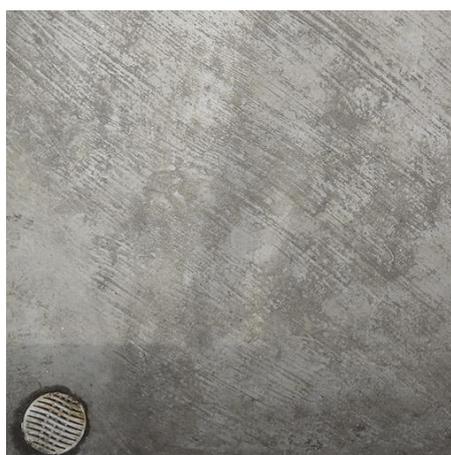
(a) Argila expandida



(b) Gramma Esmeralda



(c) Coroa-de-Frade



(d) Laje impermeabilizada

Fonte: O autor (2019).

3.2 CONSTRUÇÃO DAS UNIDADES EXPERIMENTAIS (UETER)

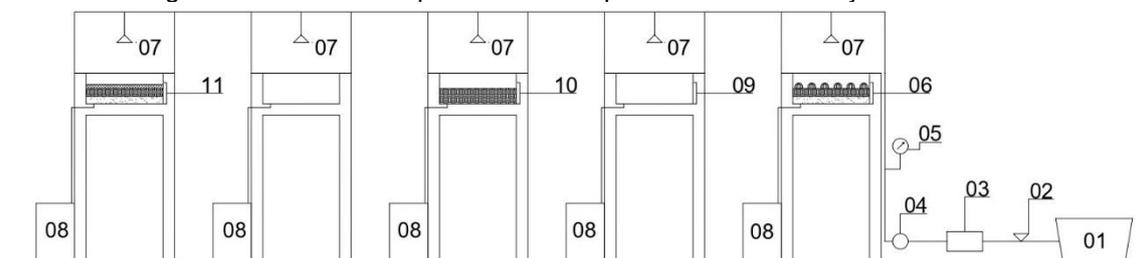
Para construção da UETER elevou-se a alvenaria, executou-se a laje pré-moldada com bloco cerâmico com instalação do dreno, além de reboco, contrapiso e instalação da tubulação de drenagem.

Para garantir que não haveria infiltração foi aplicado a argamassa da laje o aditivo Vedacit e posteriormente o impermeabilizante Sikatop 100 de acordo com instruções do fabricante. O teste de estanqueidade foi realizado conforme NBR 15575-3 que estabelece que a face inferior da laje de coberta e os encontros com as paredes e pisos adjacentes devem permanecer secos quando submetidos a uma lâmina d'água de no mínimo 10 mm, durante 72 horas.

3.3 IMPLANTAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

A água utilizada na avaliação da influência das diferentes coberturas é proveniente do sistema de simulação de chuva implantado sobre as células-teste da UETER, e é oriunda de um poço localizado perto da UETER. O referido sistema está esquematizado na Figura 5.

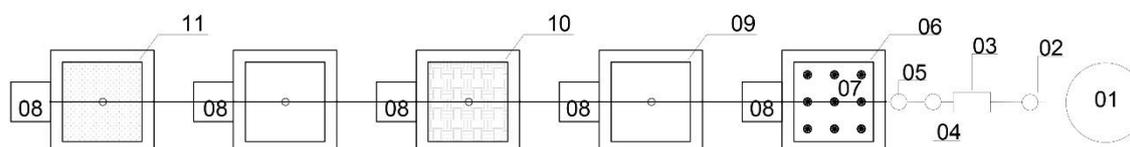
Figura 6 - Desenho esquemático do experimento de simulação de chuva.



Legenda: 01 – Reservatório 1; 02 – Válvula de gaveta; 03 – Bomba; 04 – Hidrômetro; 05 – Manômetro; 06 – Telhado verde com Coroa-de-Frade; 07 – Aspersores; 08 – Reservatório 2; 09 – Telhado controle; 10 – Telhado marrom; 11 – Telhado verde com Esmeralda.

Fonte: O autor (2019).

Figura 7 - Vista superior do experimento de simulação de chuva.



Fonte: O autor (2019).

Os componentes do sistema estão descritos a seguir.

- Reservatório 1: para armazenamento da água utilizada pelos aspersores no sistema, com capacidade para 500 litros;
- Válvula de gaveta: para controle da vazão de entrada no sistema;
- Bomba: com potência de 0,55 KW, altura manométrica mínima e máxima de 2-27 mca e vazão mínima e máxima de 0,7-3,0 m³/h;
- Hidrômetro para medir a vazão de entrada (Figura 8)
- Manômetro: medidor de pressão a marca Agatec com medição mínima de 0 e máxima de 40 mca (Figura 9).

Figura 8 - Hidrômetro utilizado no experimento.



Fonte: O autor (2019).

Figura 9 - Manômetro utilizado no experimento.



Fonte: O autor (2019).

- Telhado verde com Coroa-de-Frade: em que a laje impermeabilizada foi coberta por uma manta para drenagem Macdrain®, seguida por uma camada de 10 cm de areia para favorecer a drenagem, 10 cm de substrato de terra vegetal composta da marca Viva o Verde e a vegetação Coroa-de-Frade.
- Aspersores: comumente utilizados em jardins com ângulo de aspensão de água de 360°, e regulagem de vazão controlada.
- Reservatório 2: utilizados para coletar a água escoada dos telhados através de uma tubulação de saída.

- Telhado controle: em que a laje impermeabilizada permaneceu sem qualquer tipo de cobertura adicional, e por isso considerado na comparação com os parâmetros determinados para as outras coberturas investigadas.
- Telhado marrom: em que a laje impermeabilizada foi coberta por uma manta de drenagem Macdrain®, seguida por uma camada de 20 cm de argila expandida tipo 3222 graúda.
- Telhado verde com Esmeralda: em que a laje impermeabilizada foi coberta por uma manta para drenagem Macdrain®, seguida por uma camada de 8 cm de areia, 8 cm de substrato e a vegetação Esmeralda.

3.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE CHUVA

Para melhor simulação da chuva os irrigadores escolhidos possuíam ângulo de aspersão de 360° e foram instalados virados para baixo, conforme esquematizado na Figura 6. A pressão aplicada ao sistema era controlada através de um registro e do manômetro.

Os equipamentos instalados neste sistema, hidrômetro e manômetro, foram empregados na medição/controle da vazão de entrada no sistema e a respectiva pressão. Com a manipulação da abertura do registro, mede-se a pressão e a respectiva vazão. Convertendo a vazão em intensidade de precipitação, com a obtenção de alguns pares de pontos calculou-se uma relação entre as duas variáveis a partir de regressão linear simples. Sendo assim, foi possível controlar a intensidade do evento chuvoso empregado.

Segundo a Prefeitura do Recife (2016), a equação de intensidade-duração-frequência (IDF) da cidade de Recife é dada pela Equação 7, dado a intensidade i em mm/h, o tempo de retorno T em anos e a duração da chuva t em minutos. Entre as equações encontradas esta é a mais recente (e com uma série de dados mais extensa).

Com a Equação IDF de Recife obteve-se as intensidades máximas anuais (mm/h) das precipitações locais para diferentes tempos de retorno e diferentes durações, conforme Tabela 5. A partir da simulação da precipitação e das curvas pressão x intensidade geradas foram escolhidas duas intensidades e durações de chuvas para os tempos de retorno iguais ou abaixo de 10 anos, condizente com os T para dispositivos de microdrenagem urbana.

Tabela 5 - Valores de intensidade obtidos pela equação IDF de Recife.

Duração (min)	Tempo de retorno (anos)			
	2	3	5	10
5	139,5	149,3	162,6	182,5
10	112,3	120,2	130,9	147,0
15	95,6	102,3	111,5	125,1
30	69,0	73,8	80,4	90,3
60	47,4	50,8	55,3	62,1
120	31,7	33,9	36,9	41,4

Fonte: O Autor (2019)

Após instalação do sistema de simulação de chuva com os cinco aspersores nos telhados, foi avaliado se a vazão em todos os telhados era uniforme para diferentes medições de pressão. Para tal, utilizam-se recipientes de volume graduado e a medição de tempo em cronômetro durante 2 minutos (Figura 10).

Figura 10 - Experimento de checagem de uniformidade de vazão.



Fonte: O autor (2019).

3.5 AMOSTRAGEM E ANÁLISE LABORATORIAIS

Descreve-se a seguir o detalhamento da metodologia adotada na amostragem da água e na obtenção dos valores dos parâmetros investigados.

- i) Durante dias consecutivos, foi simulada chuva com as duas intensidades e durações escolhidas, fazendo-se aspergir a água sobre as células-teste investigadas. Foram coletadas amostras de água do ponto 01, da Figura 5, e

estas foram analisadas em laboratório conforme as metodologias explicitadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Metodologias de determinação dos parâmetros de qualidade da água.

Variável	Método	Unidade
Condutividade Elétrica	Sonda multiparâmetro	dS m ⁻¹
Cálcio e Magnésio	Titulometria	mg L ⁻¹ Ca ²⁺ mg L ⁻¹ Mg ²⁺
Sódio	Fotometria de Chama	mg L ⁻¹ Na ⁺
Carbonato e Bicarbonato	Titulometria	mg L ⁻¹ CO ₃ ²⁻ mg L ⁻¹ HCO ₃ ⁻
Cloreto	Titulação com Nitrato de Prata	mg L ⁻¹ Cl ⁻
Sulfato	Cloreto de Bário	mg L ⁻¹ SO ₄
N-Nitrato	NTD*	mg L ⁻¹ N – NO ₃
N-Amoniacal	Azul de Indofenol	mg L ⁻¹ N – NH ₃
P-Fosfato	Vanadomolibdico	mg L ⁻¹ PO ₄
Potássio	Tetrafenil-borato de sódio	mg L ⁻¹ K
Boro	Curcumina	mg L ⁻¹ B
pH	Sonda multiparâmetro	-
RAS	Equação	(mmol _c L ⁻¹) ^{1/2}
Turbidez	Turbidímetro	NTU

Legenda: RAS = razão de adsorção de sódio | NTU = unidade nefelométrica de turbidez | * Pelo procedimento metodológico, para determinação de Nitrato é necessário quantificar a concentração de Nitrito pelo método NTD e realizar cálculo. NTD: N-(1-naftil)-etilenodiamina.

Fonte: O Autor (2019)

- ii) Foram realizadas amostragens instantâneas, ou seja, a água foi coletada diretamente do tubo de escoamento e não do total armazenado durante o experimento em que foram utilizados os aspersores.
- iii) Foram realizadas amostragens diretamente do ponto 8 da Figura 6 imediatamente após a ocorrência de chuva natural.

As análises laboratoriais foram realizadas nos meses de junho e julho de 2019. As amostras foram coletadas em frascos de polietileno e transportadas ao Laboratório de Química do Grupo de Telhados Ecológicos e refrigeradas na geladeira até sua análise. As amostras foram analisadas para as variáveis de qualidade de água de acordo com a Tabela 6. As variáveis pH e condutividade elétrica foram medidas *in loco* pela sonda multiparâmetro Multi 350I da WTW.

Para garantir a precisão da leitura amostras em triplicata foram analisadas. Uma média do resultado das três amostras resultou no valor registrado. Caso fosse identificado grande discrepância no resultado de uma das três amostras esse resultado era descartado e a média realizada com as duas

amostras restantes. Análises utilizando água deionizada (branco) também foram realizadas para calibração das curvas de medição.

A turbidez foi medida através do turbidímetro HI 93703 da *Hanna Instruments*, após devida calibração. Todas as demais variáveis foram medidas utilizando kits de análise da Alfakit. Para as análises que requeriam análises colorimétricas, o fotocolorímetro de bancada AT100PBII foi utilizado. A determinação de todas as variáveis de qualidade da água determinadas em laboratório estão em conformidade com a metodologia de referência do *Standard Methods* (APHA, 2005).

3.6 MEDIÇÃO DA UMIDADE DO SOLO

A umidade antecedente do solo para os telhados verdes foi medida utilizando o sensor ECH₂O EC-5 que possui intervalo de medição de 0%-100% e resolução de 0,001 m³/m³ VWC (em português, Teor Volumétrico de Água) e altura de 7 cm. O sensor foi acoplado ao Datalogger EM50 da Decagon que possibilita um intervalo de medição de até 1 minuto.

Para avaliar o resultado da umidade obtida pelo sensor, a metodologia de aferição da umidade pela estufa foi realizada. Segundo a NBR 6457/87 (ABNT, 1986), para a realização deste teste deve-se dispor de duas capsulas de pesos diferentes, estabelecido por norma, sendo facilitado a aferição dos resultados obtidos. Sobre o método, primeiramente deve-se verificar a tara da capsula vazia, e em seguida pesa-se o conjunto capsula e solo, obtendo valores. Logo após, leva-se a capsula preenchida para a estufa, passando, de 16-24h em uma temperatura de 105-110 °C. Após este tempo, pesa-se a cápsula com o solo seco. A umidade é definida pela equação x. A média da umidade das duas capsulas é estabelecida como a umidade do solo.

$$w = \frac{(\text{peso bruto}_{\text{úmido}}) - (\text{peso bruto}_{\text{seco}})}{\text{peso bruto}_{\text{seco}}}$$

Tal que w é a umidade em m³/m³, $\text{peso bruto}_{\text{úmido}}$ é a soma do peso da cápsula com o solo úmido e $\text{peso bruto}_{\text{seco}}$ é a soma do peso da capsula com o solo após secagem na estufa. Os ensaios de umidade foram realizados no Laboratório de Geotecnia no Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados: a calibração do sistema de simulação de chuva e os resultados das variáveis de qualidade da água analisadas para a chuva simulada e chuva natural.

4.1 SIMULAÇÃO DE CHUVA

Os resultados da avaliação da uniformidade da vazão em todos os aspersores (Tabela 7) mostram uma grande variação na vazão em cada aspersor. Isso provavelmente se deu pela influência da perda de carga entre o primeiro ao último telhado e, principalmente, pela regulagem de abertura do orifício dos aspersores. Após sucessivas tentativas de regulagem dos aspersores não foi possível uniformizar a vazão em todos os telhados para construção de uma curva única de pressão x intensidade, provavelmente pela falta de precisão na regulagem do aspersor.

Tabela 7 - Vazões obtidas para diferentes pressões com cinco aspersores.

Pressão média (mca)	Vazão (L/min)				
	Grama	Controle 1	Argila	Controle 2	Coroa-de-Frade
15	3,7	4,6	5,5	4,2	4,7
14	3,7	4,5	5,2	4,0	4,4
8	2,5	3,1	3,5	2,8	3,2
6,1	2,1	2,7	3,0	2,6	2,5

Fonte: O Autor (2019).

Na segunda tentativa de simulação, apenas um aspersor foi utilizado por vez enquanto que todas as outras saídas foram tamponadas com um plug de 1/2". Para evitar o problema de regulagem dos aspersores, um único aspersor foi utilizado nas diferentes simulações. A Tabela 8 mostra os resultados da simulação. Foram realizadas duas medições consecutivas com o registro na mesma posição (e, conseqüentemente, a mesma pressão) referidas na Tabela 8 como Vazão 1 e Vazão 2.

O início da medição dos volumes nos recipientes se deu a partir do momento de estabilização da pressão no manômetro. Visto que a maior diferença entre as medições consecutivas foi de 0,6 L/min para a pressão média

de 2,9 e 5,1 mca para o telhado com argila expandida, considerou-se a vazão constante para cada telhado. Sendo assim, foram calculadas as curvas pressão x intensidade para cada telhado a partir de uma regressão linear simples conforme Fonte: O Autor (2019)

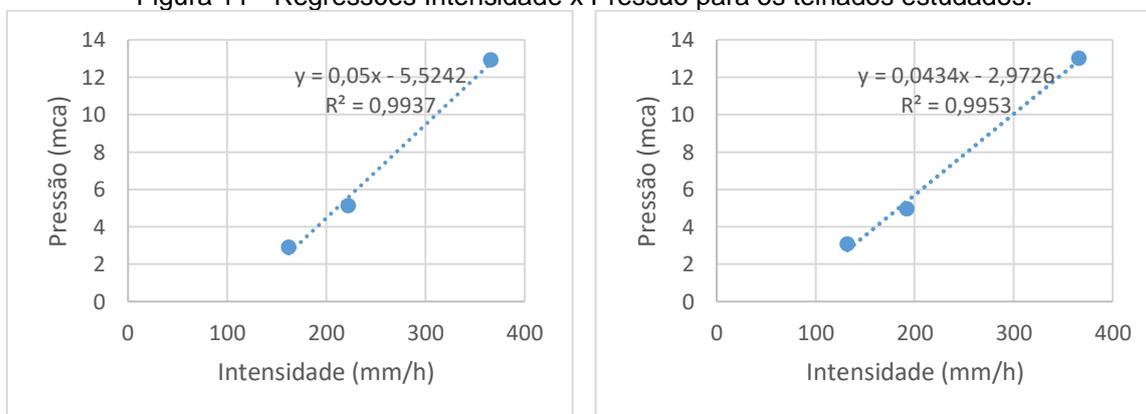
Figura 11. Note-se que os resultados abaixo são mostrados apenas para um dos dois telhados de controle da UETER, visto que para a finalidade deste trabalho há necessidade da investigação da qualidade da água em apenas um deles para comparação com os demais telhados ecológicos.

Tabela 8 - Vazões intensidades obtidas em cada telhado.

Telhado	Pressão média (mca)	Vazão 1 (L/min)	Vazão 2 (L/min)	Vazão média (L/min)	Intensidade (mm/h)
Grama	3,0	2	2,4	2,3	132
	4,9	3	3,4	3,2	192
	13,0	6	6,2	6,1	366
Controle	5,5	4	3,6	3,8	228
	8,5	4,8	5,0	4,9	294
	15,5	7,4	7,2	7,3	438
Argila	2,9	2,4	3	2,7	162
	5,1	3,4	4	3,7	222
	12,9	6	6,2	6,1	366
Coroa-de-Frade	3,5	3	2,8	2,9	156
	11,5	7,5	8	7,8	450
	15,5	8	8	8	480

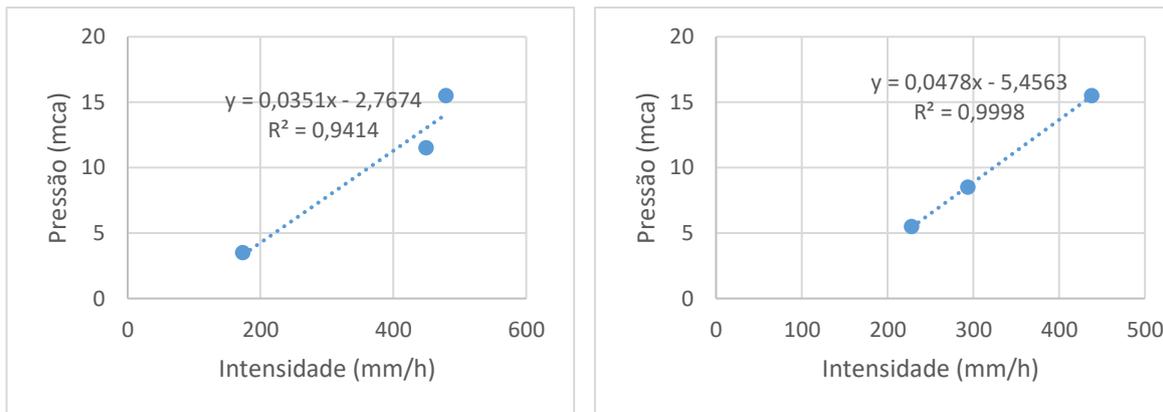
Fonte: O Autor (2019)

Figura 11 - Regressões Intensidade x Pressão para os telhados estudados.



(a) Argila.

(b) Grama Esmeralda.



(c) Coroa-de-Frade.

(d) Controle.

Fonte: o autor (2019)

Note que pelas regressões da Fonte: O Autor (2019)

Figura 11 a intensidade mínima que pode ser simulada, igualando a pressão a zero, varia entre 68 mm/h para a grama e 114 mm/h para o telhado de controle. Contudo, empiricamente notou-se que as pressões mínimas para gerar vazão variavam entre 2,0 e 2,5 mca. Sob essas condições e com base na curva IDF do novo Plano Diretor de Drenagem Urbana de Recife (PREFEITURA DO RECIFE, 2016) escolheu-se para simulação neste estudo uma chuva de 5 minutos de duração e tempo de retorno de 5 anos resultando numa intensidade de 163 mm/h (após arredondamento) resultando em um volume acumulado de 13,6 mm. As pressões médias para simulação da chuva nesta intensidade foi: 4,1 mca para o telhado verde com Grama Esmeralda, 2,6 mca para o telhado marrom com argila expandida, 2,3 o telhado de controle e 3,6 para o verde com Coroa-de-Frade.

A baixa possibilidade de escolha da intensidade da precipitação é uma limitação neste estudo e provavelmente se deu pela construção do sistema de simulação de chuva em série. Algumas alternativas para construção do sistema são: a presença de um registro de pressão em cada aspersor, garantindo o controle de vazão individualmente; alimentação do sistema com a bomba em paralelo para cada aspersor; elevação do reservatório de 500 litros acima do nível do sistema de simulação, onde a bomba alimentaria o reservatório e não mais o sistema de simulação diretamente, o escoamento neste caso se daria por gravidade. Por exemplo, o reservatório poderia estar apoiado no telhado do laboratório de hidráulica.

4.2 ANÁLISE DE QUALIDADE DA CHUVA SIMULADA E NATURAL

Os resultados das análises físico-químicas foram obtidos e estão relacionados nos tópicos a seguir.

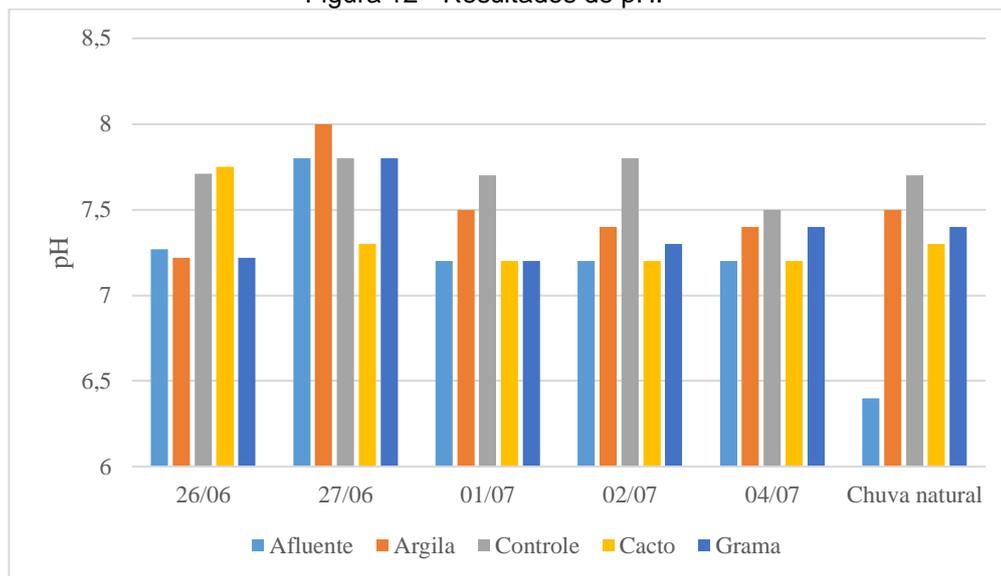
4.2.1 pH

Todas as amostras mostraram um aumento do pH após a passagem pelos telhados tanto para os eventos simulados quanto para a chuva natural conforme Figura 12.

O telhado de controle foi o que obteve os maiores valores de pH de $7,70 \pm 0,12$ (média \pm desvio padrão). Tal fato pode ter se dado pela dissolução de substâncias alcalinas relacionadas ao cimento e ao impermeabilizante da laje, em especial o carbonato de cálcio. No estudo de Lima (2012), onde avaliou-se a qualidade da água em cisternas também construídas com cimento, observou-se que quanto mais nova a cisterna maior foram os teores de alcalinidade. Visto que a alvenaria foi construída há menos de 2 anos, também podemos atribuir o aumento do pH a este fator. Nos telhados ecológicos, a presença das demais camadas minimizou este efeito. Entre os telhados verdes os resultados foram bastante similares, de $7,38 \pm 0,24$ para a grama e $7,33 \pm 0,24$ para o cacto. Já para o telhado marrom, obteve-se resultados de $7,50 \pm 0,29$.

No geral, a neutralização do pH é um benefício para todos os telhados ecológicos. Todas as amostras encontram-se de acordo com os parâmetros definidos por Almeida (2010), que estabelece um pH para irrigação entre 6 e 8,5. Os resultados estão de acordo com estudos utilizando diferentes substratos e vegetações presentes na literatura (RAZZAGHMANESH, *et al.*, 2014; VIJAYARAGHAVAN; JOSHI, 2014; BUFFAM; MICHELL; DURTSCHKE, 2016). Em estudos no semiárido de Pernambuco, resultados de pH neutro-alcalino também foram encontrados (FARIAS, 2012; LIMA, 2013; SILVA, 2017).

Figura 12 - Resultados do pH.



Fonte: O autor (2019).

4.2.2 Turbidez

Para a variável Turbidez, de acordo com a Figura 13 notou-se que o telhado verde com Coroa-de-Frade obteve os maiores valores para os eventos simulados ($277,7 \text{ NTU} \pm 39,2 \text{ NTU}$), seguido pela argila expandida ($17,5 \text{ NTU} \pm 13,5 \text{ NTU}$), pela grama ($12,7 \text{ NTU} \pm 5,3 \text{ NTU}$) e o telhado de controle ($4,2 \text{ NTU} \pm 4,9 \text{ NTU}$). Para melhor visualização dos resultados, o eixo y da Figura 13 encontra-se em escala logarítmica.

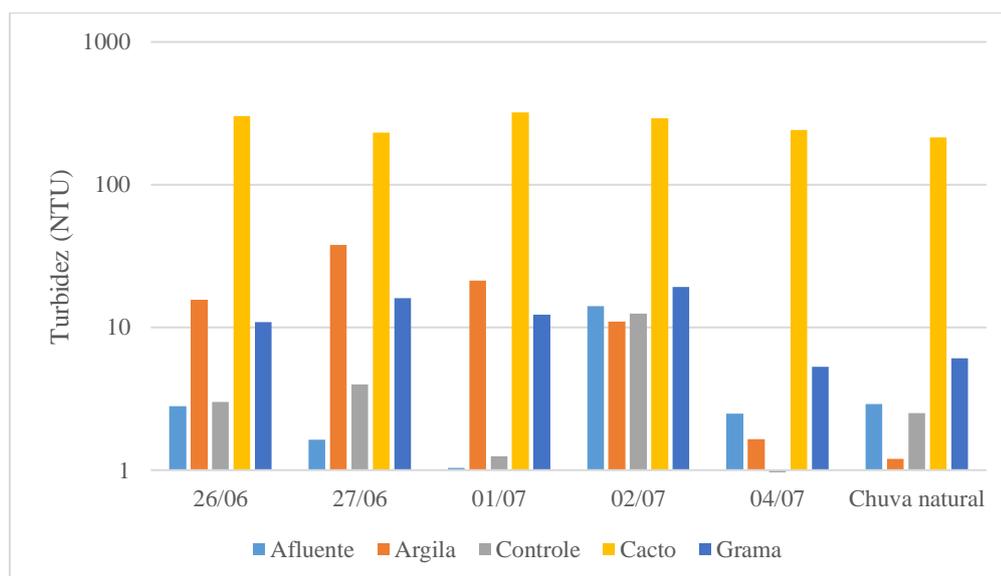
Ainda que Morgan *et al.* (2011) indicaram que a turbidez está altamente associada com o tipo do substrato, ambos os telhados verdes possuem o mesmo substrato não sendo este o fator da diferença. Sendo assim, a maior turbidez provinda do telhado com Coroa-de-Frade pode ser explicada pela maior exposição do solo facilitando o carregamento de sedimentos e pelo formato das raízes da vegetação, uma vez que não são tão ramificadas quanto a da grama esmeralda. A turbidez para o evento com chuva natural foi menor que a médias dos eventos simulados (menos expressiva no telhado de controle), provavelmente pela intensidade da chuva simulada ser maior que a chuva natural.

A turbidez do telhado de controle apresentou valores de turbidez muito próximos ao afluente, isso mostra que as prováveis fontes dos sólidos suspensos causadores do aumento da turbidez dos telhados ecológicos provêm do

substrato. Além disso, como os experimentos foram realizados em período chuvoso e em dias seguidos, a baixa turbidez do telhado de controle pode ser explicada pela ausência de dias secos (sem precipitação) entre os experimentos e conseqüentemente prevenindo a deposição de material como, por exemplo, poeira, folhas e dejetos de animais. Em estudo no semiárido de Pernambuco, Lima (2013) também identificou concentrações mais altas nos telhados verdes ao telhado sem vegetação estudado. Entre as vegetações estudadas estavam a Babosa e Coroa-de-Frade, este último apresentando valores menores de turbidez variando entre 19 NTU a 90 NTU nas análises realizadas.

A turbidez tem alta correlação com a idade do telhado, uma vez nos primeiros anos pode haver carreamento do material mais fino. A inserção do substrato e vegetação na UETER se deu um ano antes da realização do experimento, podendo ser este um fator também relacionado. Ainda, pode também haver influência de problemas na instalação da manta no telhado de Coroa-de-Frade. A turbidez não possui parâmetros estabelecidos para utilização da água para irrigação.

Figura 13 - Resultados da turbidez



Fonte: O autor (2019).

4.2.3 Condutividade Elétrica (CE)

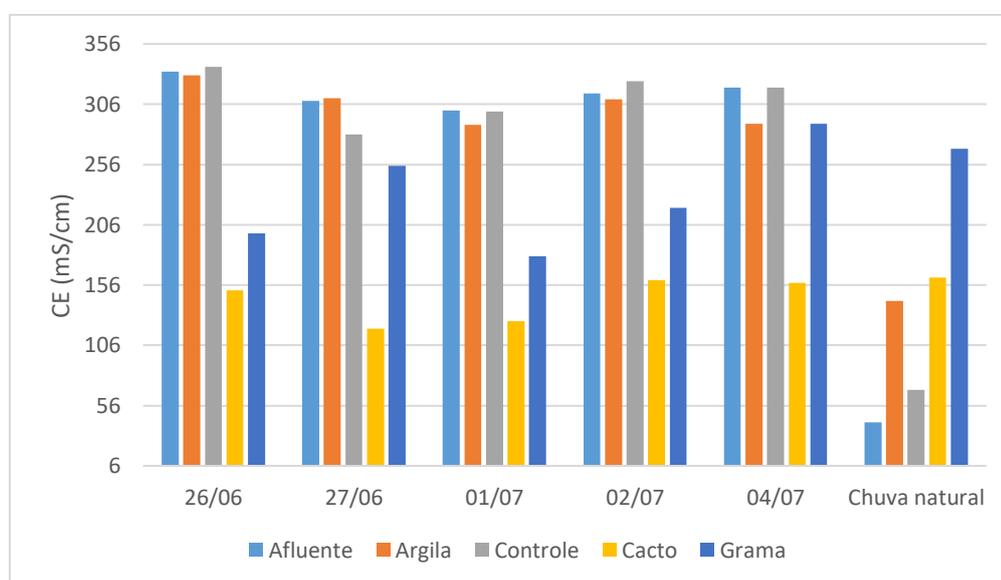
Nos experimentos para a chuva simulada apenas os telhados verdes diminuíram a condutividade elétrica, sendo o telhado com Coroa-de-Frade o que obteve maior eficiência de remoção. O efeito inverso foi notado para a chuva

natural analisada. Todos os telhados aumentaram a CE, com o maior aumento no telhado verde de Grama Esmeralda (Figura 14).

O aumento da CE nos telhados verdes para a chuva natural é justificado pela presença de matéria orgânica nas duas coberturas vegetadas. A decomposição da matéria orgânica libera íons e nutrientes que são carregados pela água, uma vez que o substrato de ambos os telhados é de matéria orgânica vegetal.

Apenas a CE dos telhados verdes, quando utilizado os valores médios dos experimentos simulados encontram-se dentro dos parâmetros de Almeida (2010) que possui valor máximo de 300 mS/cm. Para o experimento utilizando chuva natural todos os telhados encontram-se de acordo com os parâmetros para irrigação.

Figura 14 - Resultados da Condutividade Elétrica.



Fonte: O autor (2019).

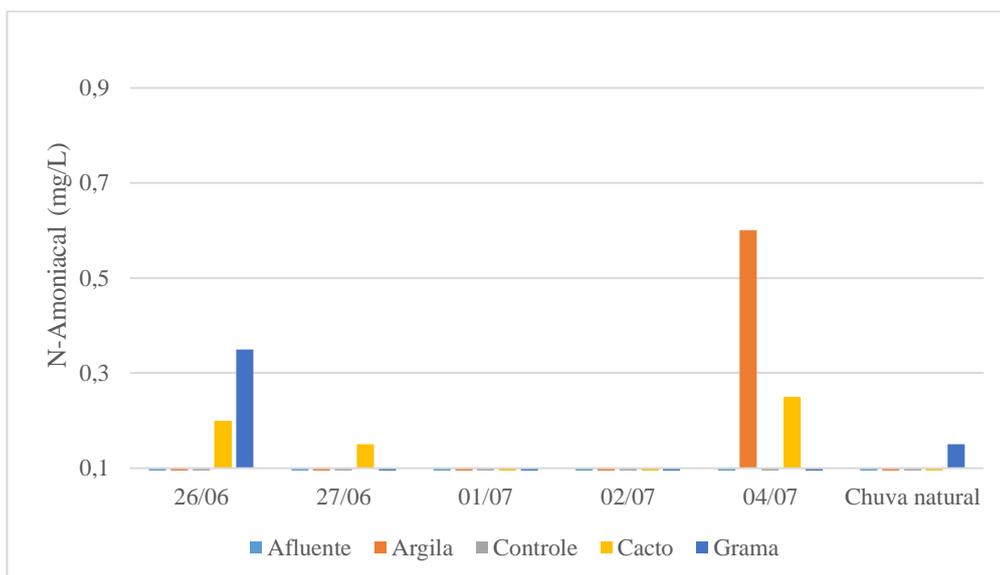
4.2.4 Nitrogênio amoniacal, nitrato e fosfato

As concentrações de nitrogênio amoniacal nos afluentes da chuva sintética e da chuva natural para todos os ensaios foi abaixo do nível de detecção (0,1 mg/L) (Figura 15). Em algumas situações houve um aumento na concentração de N-amoniacal nos telhados verdes e contendo argila expandida chegando a um máximo de 0,60 mg/L. Considerando o limite de 5 mg/L para N-

amoniacoal para irrigação (ALMEIDA, 2010) todas as amostras encontram-se dentro dos limites estabelecidos.

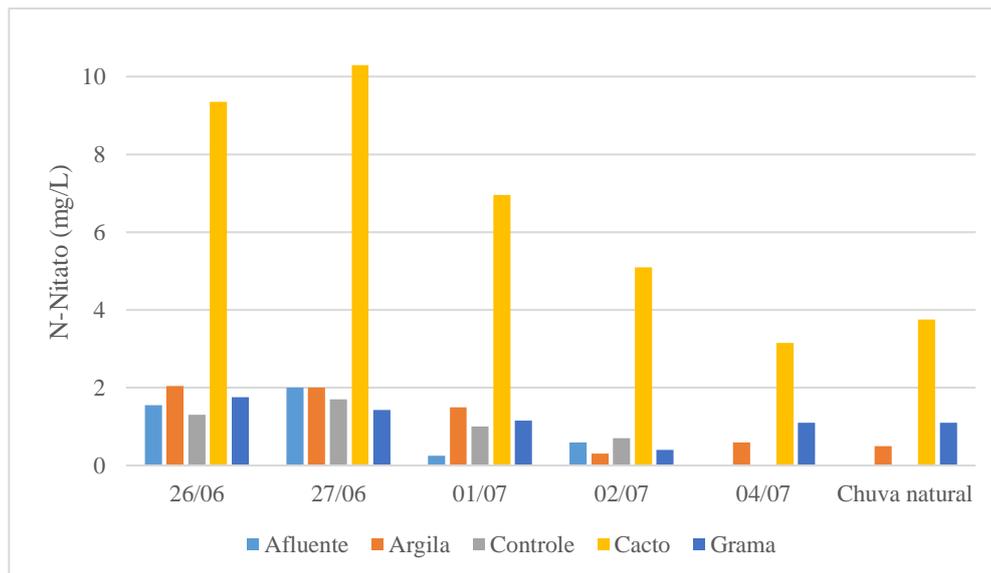
Considerando N-nitrato, o telhado verde com Coroa-de-Frade obteve os maiores valores ($6,43 \text{ mg/L} \pm 2,95 \text{ mg/L}$) e em um dos ensaios ($10,30 \text{ mg/L}$) superou o limite estabelecido para nitrato por Almeida (2010) de 10 mg/L (Figura 16). O telhado verde com Grama Esmeralda e argila expandida obtiveram médias iguais de $1,16 \text{ mg/L}$ e desvios de $0,45 \text{ mg/L}$ e $0,79 \text{ mg/L}$, respectivamente. No telhado de controle não houve grandes alterações na concentração desta variável ($0,78 \text{ mg/L} \pm 0,69 \text{ mg/L}$) para o afluente ($0,73 \text{ mg/L} \pm 0,85 \text{ mg/L}$). Nota-se um aumento mais significativo nas concentrações de nitrato para os eventos simulados em comparação com a chuva natural, mesmo que as concentrações de N-nitrato dos afluentes sejam similares. Isso pode ter ocorrido devido à intensidade da chuva simulada em comparação com a chuva natural, possibilitado um maior carreamento de nitrato.

Figura 15 - Resultados de N-amoniacoal.



Fonte: O autor (2019).

Figura 16 - Resultados de N-nitrato.



Fonte: O autor (2019).

Dado os resultados de N-amoniaco e N-nitrato, considera-se que os telhados verdes não são fontes desses componentes com exceção do telhado verde com Coroa-de-Frade. Outros trabalhos na literatura também encontraram que telhados ecológicos podem tanto aumentar as concentrações de espécies de nitrogênio (BEECHAM; RAZZAGHMANESH, 2015) como não alterar as concentrações de espécies de nitrogênio ou até diminuir essas concentrações (BERNDTSSON; BENGTSSON; JINNO, 2009). Esses resultados estão em conformidade com os estudos realizados no semiárido Pernambucano. Lima (2013) encontrou maiores concentrações de nitrogênio na espécie nitrato atingindo até 202,36 mg/L. Em estudo posterior no mesmo local Silva (2017) encontrou valores de nitrato 2,3 mg/L, indicando a possível influência da idade do telhado nesta variável.

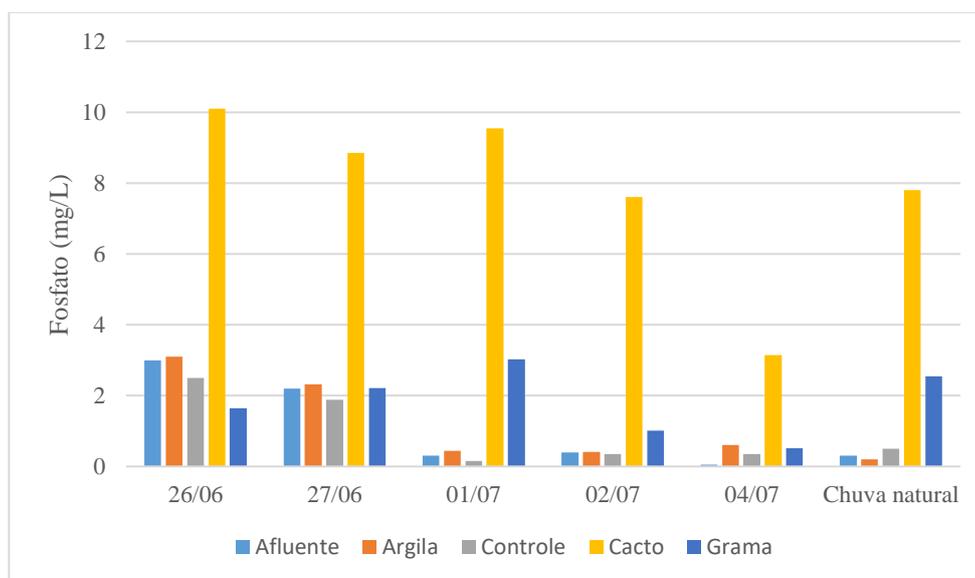
Os telhados verdes também serviram de fonte de fosfato. O que contém Coroa-de-Frade obteve maiores valores para a água escoada tanto da chuva sintética quanto da natural. O telhado verde com Grama Esmeralda lixiviou fosfato em pequenas quantidades ou não alterou as concentrações nos experimentos realizados.

Berndtson (2010) indicam que chuvas intensas são responsáveis por maiores concentrações de espécies de nitrogênio e fósforo que chuvas menos intensas, embora outros fatores podem influenciar esses resultados.

O motivo do telhado verde com Coroa-de-Frade lixiviar as maiores concentrações de N-amoniaco, N-nitrato e fosfato, provavelmente se deu pelo substrato utilizado ser rico em nutrientes. A espécie cactácea não está se utilizando de todo o nutriente disponível resultando em sua lixiviação. A utilização de um substrato mais pobre em nutrientes seria uma alternativa para reduzir as concentrações de compostos de nitrogênio e fósforo nos efluentes. Futuras análises são necessárias para verificar se a quantidade de nutrientes lixiviados estabilizaram, uma vez que as concentrações de nutrientes são maiores para telhados recém-construídos e diminuem com o tempo (TODOROV *et al.*, 2018).

Almeida (2010) estabelece um limite máximo de 2 mg/L de fosfato. Em todas as análises o telhado verde com Coroa-de-Frade superou os limites recomendados (Figura 17). Para a análise da chuva natural, o telhado com Grama Esmeralda também se encontrou fora dos limites. Nos dias 26/06 e 27/06 o afluente obteve concentrações de 3,00 mg/L e 2,20 mg/L já estando acima do recomendado. Em estudos do semiárido, Farias (2012), Lima (2013) e Silva (2017) os telhados verdes estudados também foram fontes de fósforo estando todos os seus efluentes acima do limite estabelecido por Almeida (2010).

Figura 17 - Resultados de fosfato.



Fonte: O autor (2019).

4.2.5 Carbonato, bicarbonato e cloreto

O carbonato e bicarbonato junto com hidróxidos são as principais formas contribuintes para a alcalinidade da água. A alcalinidade é a capacidade que um sistema aquoso possui de neutralizar ácidos fracos. Por exemplo, uma água com baixa alcalinidade terá seu pH reduzido pela presença de um ácido fraco, enquanto que uma água com alta alcalinidade terá mais resistência de redução do pH.

Em todas as amostras analisadas não foi detectada a presença de carbonato. Os telhados de controle (34,2 mg/L \pm 4,5 mg/L) e de argila expandida (25,5 mg/L \pm 4,6 mg/L) apresentaram os maiores valores para a variável bicarbonato (Figura 18). Os telhados verdes contendo Coroa-de-Frade (13,6 mg/L \pm 2,2 mg/L) e Grama Esmeralda (11,2 mg/L \pm 1,9 mg/L) obtiveram concentrações de bicarbonato similares. De acordo com Almeida (2010), o limite máximo de bicarbonato para água de irrigação é de 10 meq L⁻¹, ou 610 mg L⁻¹. Todas as amostras enquadraram-se neste parâmetro.

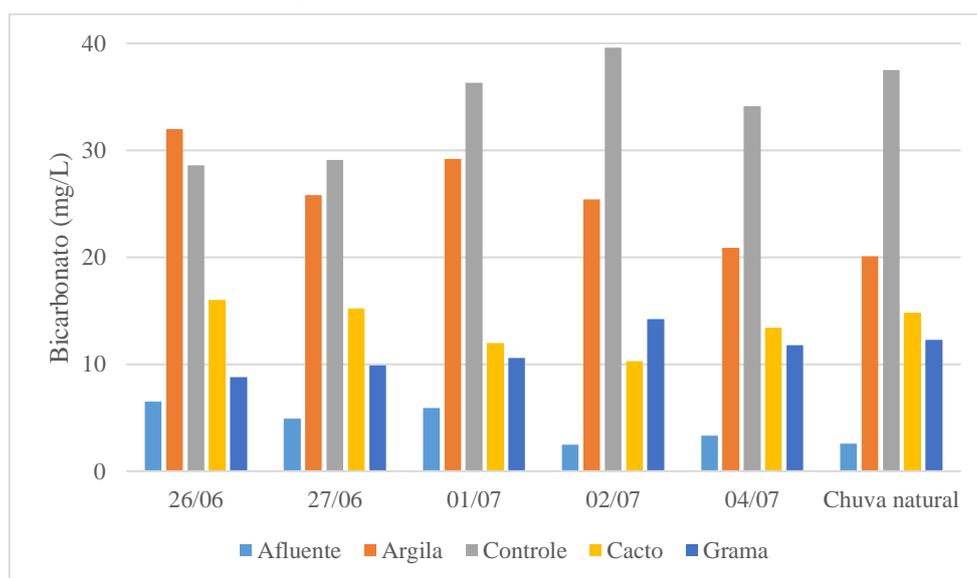
Sabe-se que carbonatos (CO₃²⁻) e bicarbonatos (HCO₃⁻) são substâncias presentes no cimento, em especial na forma de bicarbonato de cálcio (CaCO₃), derivado de rochas calcárias. Nos telhados de controle e com argila expandida, o contato da água com a superfície cimentada da laje provavelmente promoveu a dissolução desses íons. Nos telhados verdes, devido à presença das camadas de vegetação e substrato, esse contato foi reduzido resultando em menores concentrações de bicarbonato.

Não é possível a coexistência dos três íons (carbonato, bicarbonato e hidróxidos) em uma mesma amostra, pois o bicarbonato reage com o hidróxido. Se uma amostra tiver um pH entre 4,5 e 8,3 (todas as amostras encontram-se nessa faixa de pH) a alcalinidade se dá apenas pela presença de bicarbonato (VON SPERLING, 1995), explicando a ausência do íon carbonato nos resultados. Esse efeito se dá pelo equilíbrio entre o gás carbônico, carbonato e bicarbonato na amostra. Silva (2017) também não encontrou a presença de íons carbonato nos efluentes dos telhados verdes estudados, contudo encontrou valores muito acima (1130 mg/L) dos encontrados nas UETER.

A fonte de cloreto pode se dar pela dissolução dos íons no solo, contaminação por esgoto doméstico (VON SPERLING, 1995). Já os cloretos presentes na precipitação podem ter como origem os cristais de sais provindos da evaporação de oceanos. Considerando o limite recomendado por Almeida

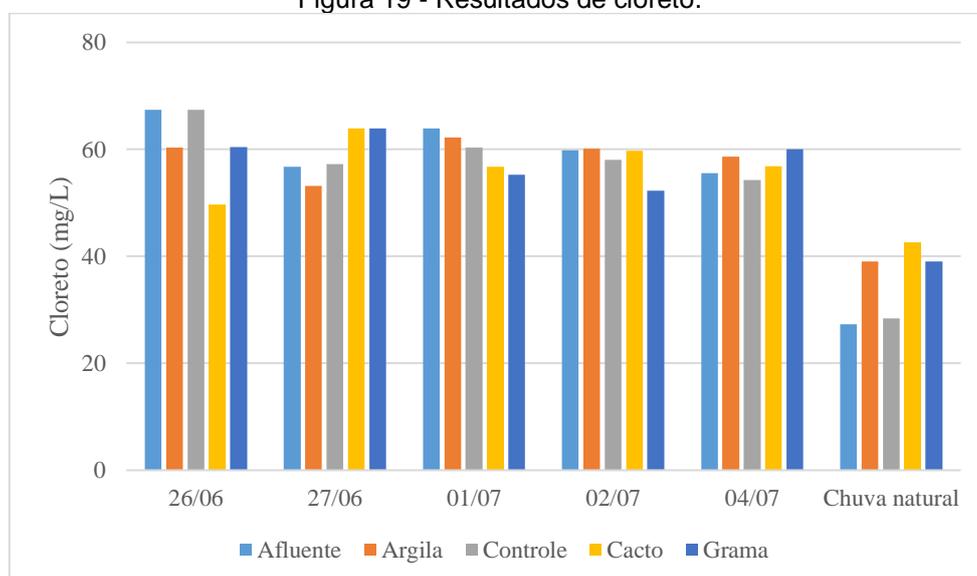
(2010) de 30 meq L⁻¹, ou seja, 1063,8 mg/L, todas as amostras encontraram-se muito abaixo do limite. De acordo com a Figura 19 nota-se que os telhados não foram fontes ou retiveram cloreto. Sendo assim, o cloreto não seria uma fonte de salinidade do solo, uma vez que o cloreto é capaz de ter o mesmo efeito que o sódio em relação a salinidade, mas possui efeitos menos tóxicos para as plantas (TESTER; DAVENPORT, 2003). Estudos no semiárido (FARIAS, 2012; LIMA, 2013; SILVA, 2017) encontraram valores menores que os parâmetros de irrigação.

Figura 18 - Resultados de bicarbonato.



Fonte: O autor (2019).

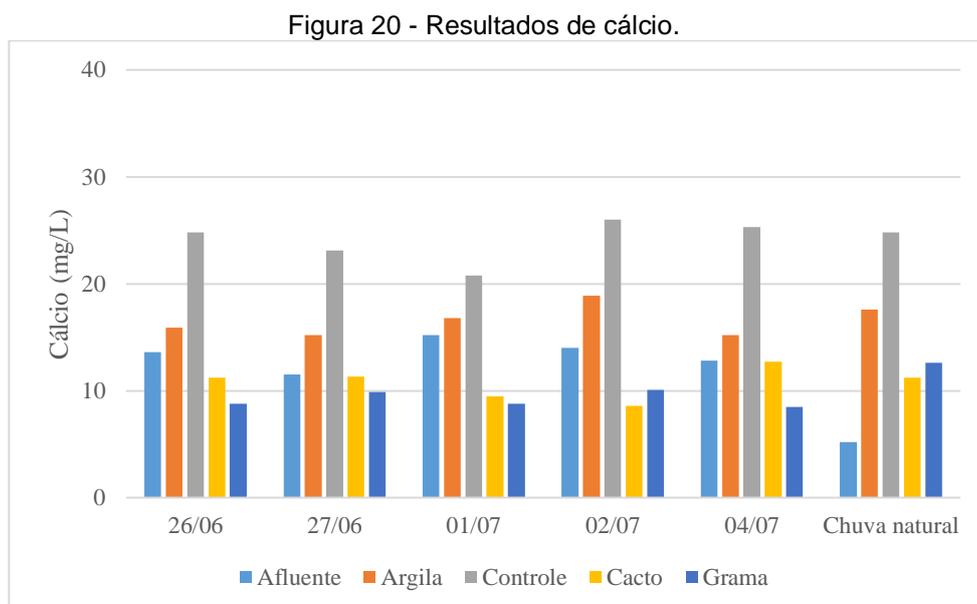
Figura 19 - Resultados de cloreto.



Fonte: O autor (2019).

4.2.6 Cálcio e magnésio

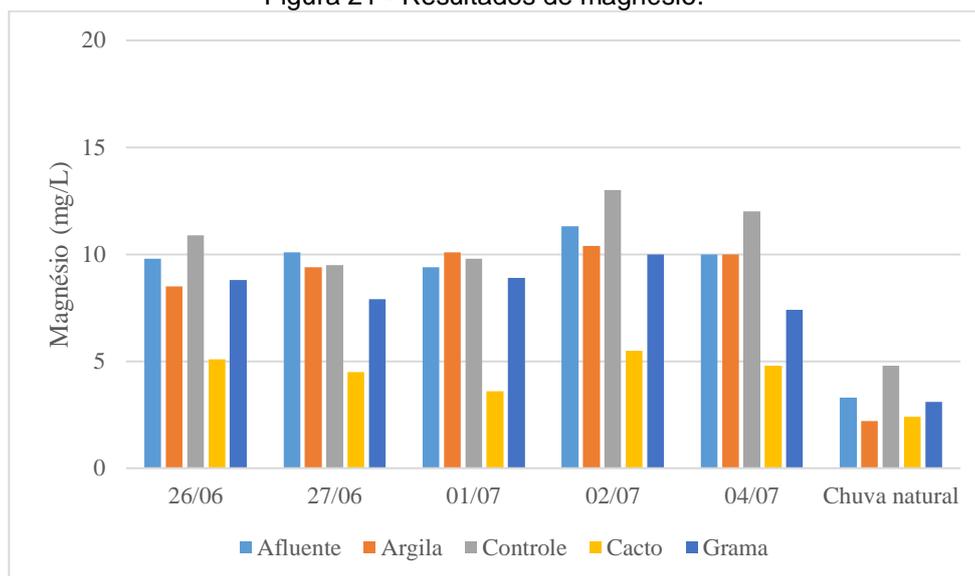
Cálcio segue a mesma tendência do bicarbonato, sustentando a hipótese do carbonato de cálcio pode ser o causador da presença da alcalinidade nas amostras. Uma vez que segundo a publicação da EMBRAPA sobre “qualidade da água para irrigação” (ALMEIDA, 2010) o valor máximo para o cálcio é de 2000 mg/L, todas as amostras obtiveram valores muito abaixo do limite recomendado (Figura 20). Ainda, a maior presença de Ca nos telhados contendo argila expandida e de controle corrobora com a hipótese da dissolução de carbonato de cálcio na água escoada.



Fonte: o autor (2019).

Os valores para magnésio se mantiveram semelhantes aos afluentes para todos os telhados com exceção da Coroa-de-Frade que foi capaz de absorver parte do Magnésio (Figura 21). De acordo com Almeida (2010), o limite recomendado para magnésio é de 486 mg/L, sendo assim todos os efluentes dos telhados registraram valores bem abaixo do parâmetro estabelecido. Silva (2017) encontrou valores entre 13,4 mg/L e 14,8 mg/L para cálcio e 152,8 mg/L a 356,1 mg/L para magnésio, esse último muito acima dos valores encontrados no estudo nas UETER.

Figura 21 - Resultados de magnésio.



Fonte: o autor (2019).

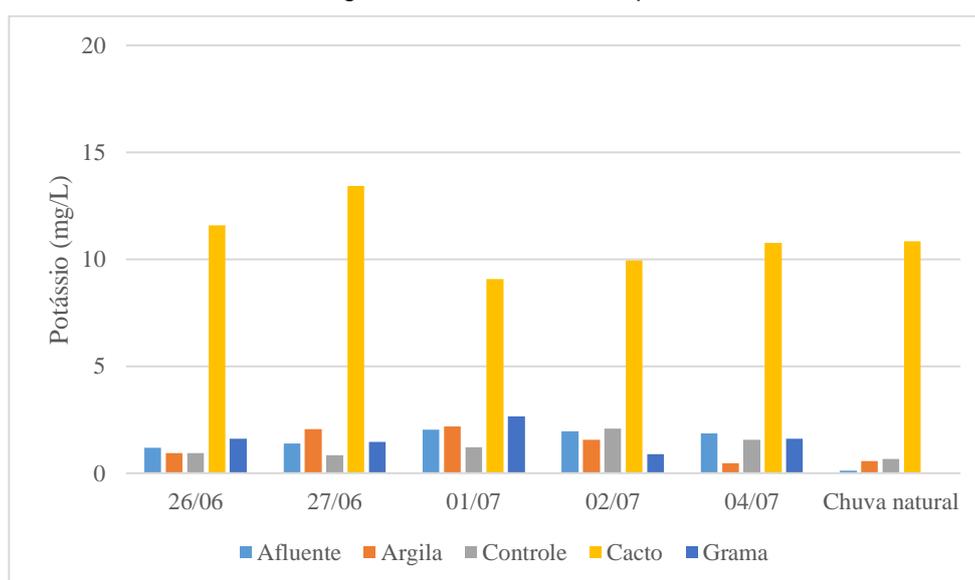
4.2.7 Potássio, sulfato e boro

Em relação ao potássio, os efluentes do telhado marrom com Argila expandida ($1,30 \text{ mg/L} \pm 0,75 \text{ mg/L}$), o de controle ($1,22 \text{ mg/L} \pm 0,53 \text{ mg/L}$) e telhado verde com Grama Esmeralda ($1,37 \text{ mg/L} \pm 0,88 \text{ mg/L}$) ficaram abaixo do limite recomendado por Almeida (2010) de 2 mg/L . Os efluentes do telhado verde com Coroa-de-Frade obteve média das amostras de potássio aproximadamente 5 vezes maior que o limite recomendado para irrigação ($10,94 \pm 1,49$). Silva (2017) encontrou valores entre $18,0 \text{ mg/L}$ e $18,8 \text{ mg/L}$ para os efluentes de telhados verdes de Babosa e Coroa-de-Frade no semiárido. Ainda em seu estudo, um dispositivo filtro com areia e carvão ativado foi estudado e não conseguiu reduzir os níveis de potássio abaixo dos parâmetros estabelecidos por Almeida (2010) obtendo remoções de até 12,2% e 10% para Babosa e Coroa-de-Frade, respectivamente.

A água de poço utilizada para as análises da chuva simulada continha altos níveis de sulfato em comparação com a água da chuva natural. A presença dessas concentrações de sulfato na água de poço pode ser devido a decomposição de solos e rochas presentes no aquífero como o gesso (CaSO_4) e o sulfato de magnésio (MgSO_4). A análise de sulfato da água de chuva natural resultou em valores abaixo do nível de detecção ($0,1 \text{ mg/L}$). Considerando que a UETER se encontra em uma região residencial e o período chuvoso é

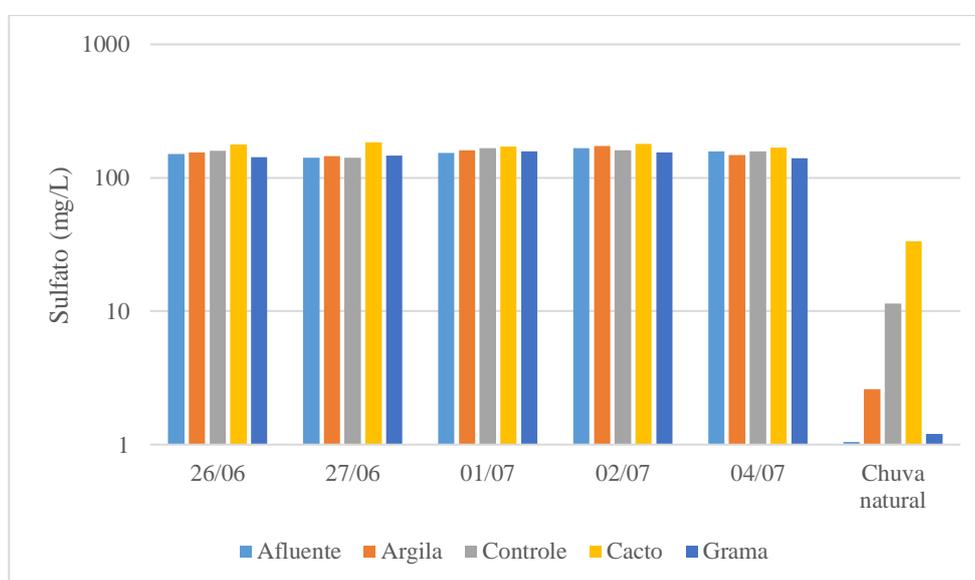
responsável por “lavar” a atmosfera, esse valor baixo pode ser justificado. O telhado verde com Coroa-de-Frade foi uma fonte de sulfato tanto para os experimentos simulados quanto para o com chuva natural, os demais não apresentaram diferenças tão significativas em relação às concentrações iniciais (Figura 23). O telhado verde com Coroa-de-Frade foi fonte de sulfato para todos os experimentos analisados. De acordo com Almeida (2010), o limite recomendado máximo para sulfato é de 960,6 mg/L, sendo assim, todas as amostras encontraram-se dentro dos valores recomendados para irrigação.

Figura 22 - Resultados de potássio.



Fonte: O autor (2019).

Figura 23 - Resultados de sulfato.

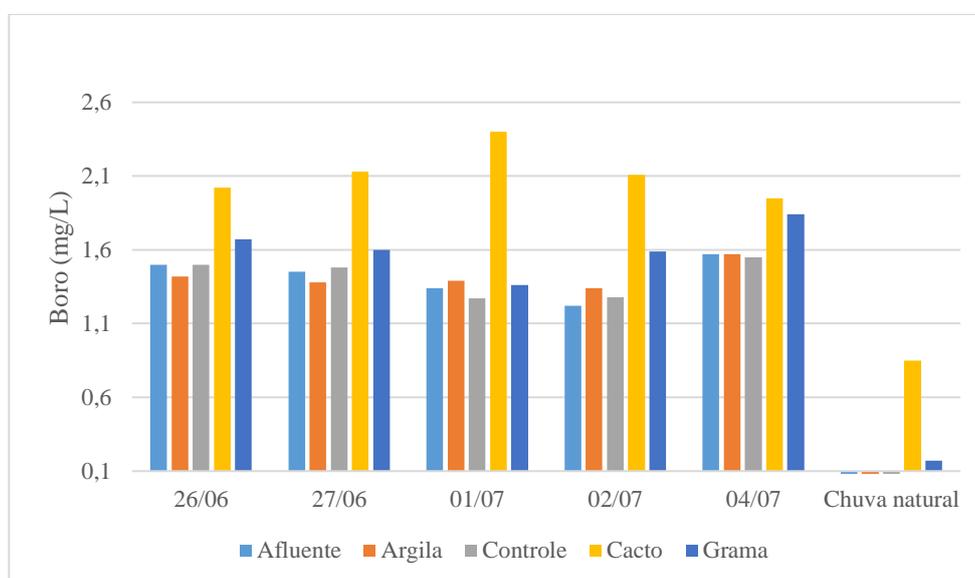


Fonte: O autor (2019).

O sulfato em conjunto com o nitrato (que também obteve valores abaixo do nível de detecção de 0,1 mg/L) são substâncias que contribuem para a chuva ácida, por em meio aquoso serem capazes de produzir os ácidos sulfúrico (H₂SO₄) e nítrico (HNO₃). A baixa concentração desses íons contribuiu para um pH mais neutro da chuva de 6,4. De acordo com os estudos analisados por Hashemi, Mahmud e Ashraf (2015) normalmente o pH da chuva se encontra entre 5 e 6. Estudos no período seco são necessários para avaliar o efeito dessas variáveis.

Na chuva natural não foram detectados níveis de Boro acima do limite de quantificação inferior (0,1 mg/L) para o afluente, o telhado marrom com argila expandida e o telhado de controle. Assim como nos experimentos utilizando chuva simulada. Em concordância com Ferrans *et al.* (2018) os telhados verdes foram fontes de Boro, sendo mais acentuado no que contém Coroa-de-Frade como vegetação. A presença do Boro está associada à composição do substrato e na Coroa-de-Frade ao baixo poder de assimilação pela vegetação. A concentração mais alta de Boro nos experimentos simulados possivelmente foi devido à presença de rochas do aquífero que contenham Boro, visto que a água utilizada para esses experimentos foi uma água de poço. Silva (2017) encontrou valores muito acima de Sulfatos em suas análises (2685 mg/L a 3050 mg/L) e valores abaixo de Boro (0,6 mg/L a 0,9 mg/L) dos encontrados nas UETER.

Figura 24 - Resultados de boro.

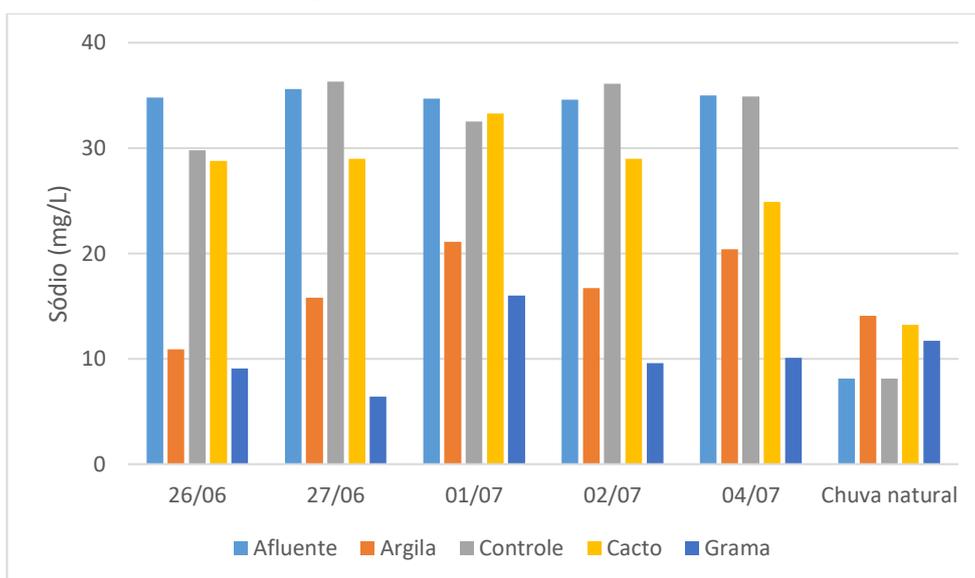


Fonte: O autor (2019).

4.2.8 Sódio e RAS

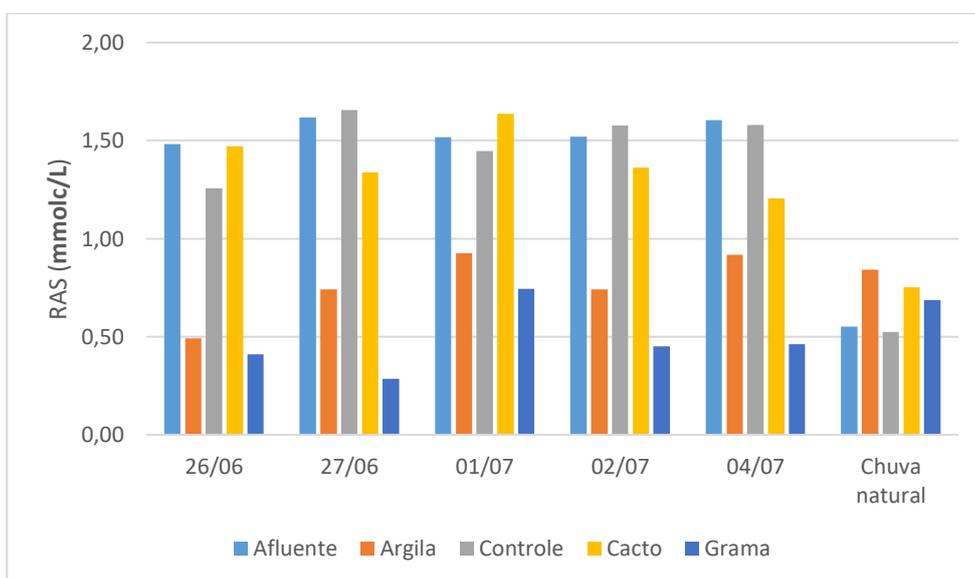
Os valores de sódio e RAS encontraram-se muito abaixo dos limites estabelecidos por Almeida (2010) de 919,6 mg/L e $(15 \text{ mmol}_c\text{L}^{-1})^{1/2}$ para todos os telhados estudados. Silva (2010) encontrou resultados similares para os telhados verdes, de 19,1 mg/L a 20,9 mg/L de sódio e 1,4 $(\text{mmol}_c\text{L}^{-1})^{1/2}$ a 2,3 $(\text{mmol}_c\text{L}^{-1})^{1/2}$. Isso é um indicativo da não presença de sodicidade no solo, fator esse que poderia diminuir a condutividade hidráulica afetando o crescimento da vegetação e retenção hídrica.

Figura 25 - Resultados de sódio.



Fonte: O autor (2019).

Figura 26 - Resultados de RAS.



Fonte: O autor (2019).

4.2.9 Efeito da umidade antecedente

Os resultados da análise da umidade antecedente pelo método de pesagem e utilizando o sensor de umidade encontram-se na Tabela 9. A maior diferença entre as duas medições foi de 15,28% ou de 0,055 m³/m³ em valor absoluto.

Pelas análises de qualidade realizadas não foi verificado nenhum efeito da umidade antecedente nas variáveis de qualidade. Um estudo a longo prazo precisa ser realizado para melhor analisar seu efeito. Especialmente em diferentes temperaturas do ar e período seco antecedente, visto que essas são variáveis muito correlacionadas com a qualidade da água (BUFFAM; MITCHELL; DURTSCHKE, 2016).

Tabela 9 - Comparação entre medições de umidade.

Ensaio	Gramma		Cacto	
	Sensor (m ³ /m ³)	Laboratório (m ³ /m ³)	Sensor (m ³ /m ³)	Laboratório (m ³ /m ³)
01/07	0,302	0,3358	0,260	0,2360
02/07	0,375	0,3719	0,307	0,3624
04/07	0,315	0,3233	0,285	0,2690

Fonte: O Autor (2019)

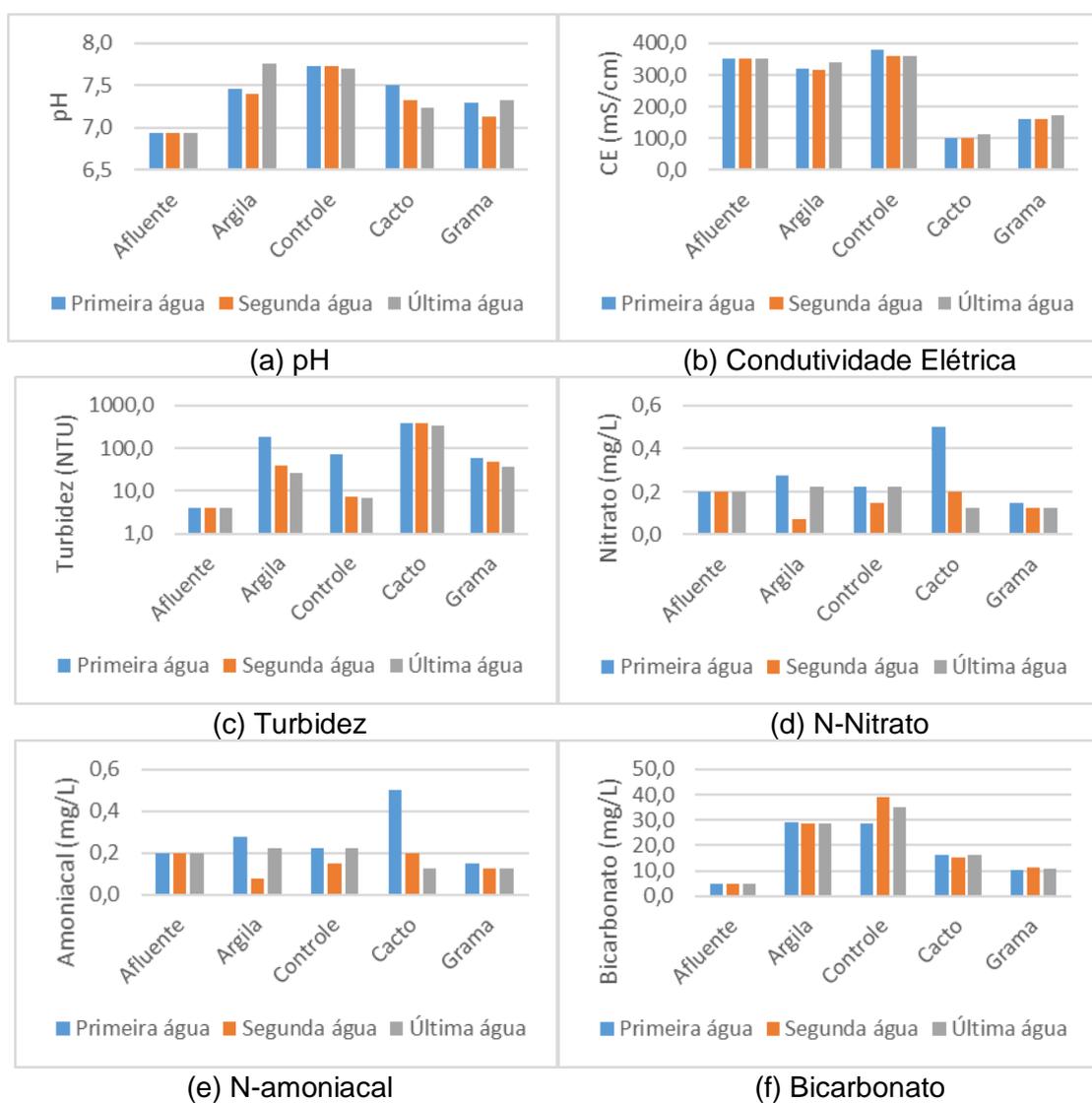
4.3 Análise de qualidade por amostragem instantânea

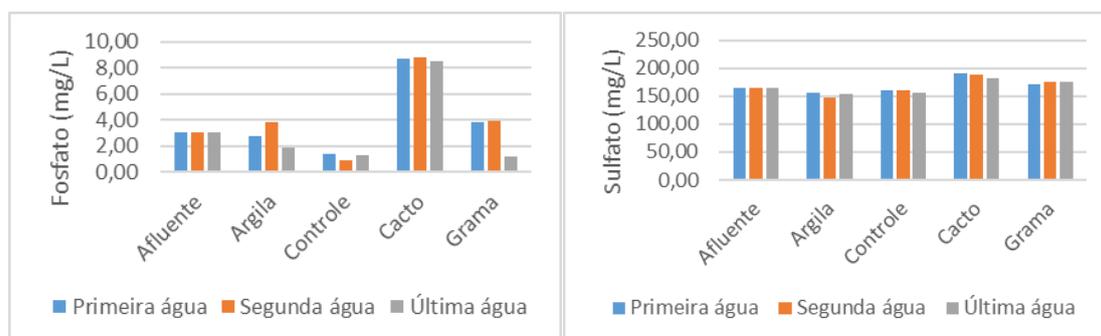
A Figura 27 mostra os resultados do experimento por amostragem instantânea. O telhado verde de Coroa-de-Frade foi o que obteve maiores alterações com a coleta de amostras em diferentes tempos, especialmente houve diminuição mais expressiva das variáveis: N-nitrato, N-amoniaco, cálcio e potássio. Visto que as variáveis que superaram os parâmetros recomendados para irrigação (ALMEIDA, 2010) utilizando a chuva natural foram fósforo e potássio, este experimento por amostragem em diferentes tempos de um mesmo evento de precipitação indica que um dispositivo de descarte de primeiras águas seria uma alternativa para mitigar os efeitos de lixiviação de potássio, mas não de fósforo. O dispositivo de descarte de primeiras águas é uma barreira sanitária que desvia as primeiras águas de cada chuva para descartar as águas que lavam

a atmosfera e a superfície de captação. Esse tipo de dispositivo tem se mostrado muito eficiente (ALMEIDA *et al.* 2016; ARAÚJO, 2017).

Silva (2017) desenvolveu um filtro contendo areia e carvão ativado que foi capaz de diminuir os níveis de fósforo de efluentes de telhados verdes contendo Coroa-de-Frade e Babosa. Sendo assim, o possível sistema para estudo para redução das duas variáveis citadas e enquadramento de todos os parâmetros nas recomendações de Almeida (2010) seria: um sistema de tratamento em série contendo um desviador de primeiras águas e um filtro de areia e carvão ativado.

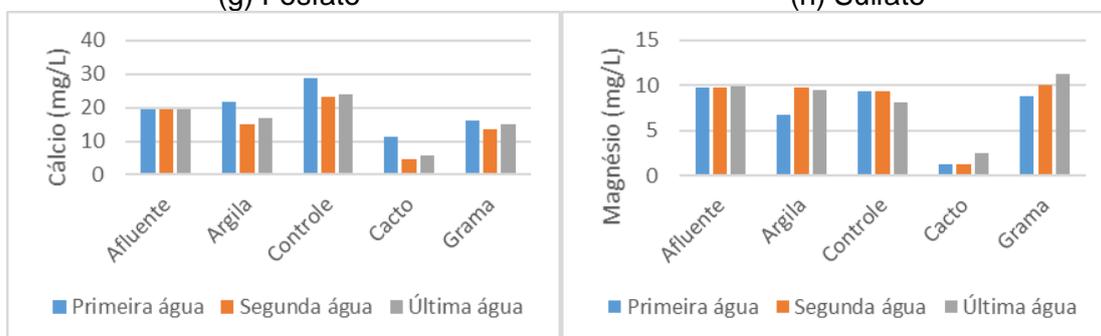
Figura 27 - Resultados das amostras instantâneas para as variáveis analisadas





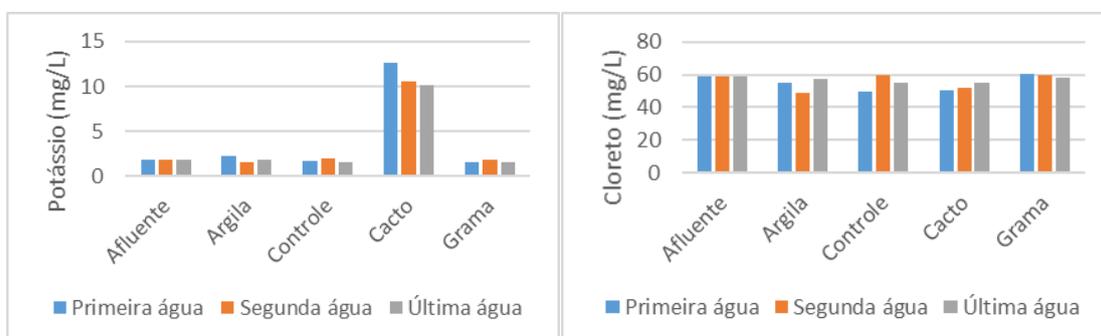
(g) Fosfato

(h) Sulfato



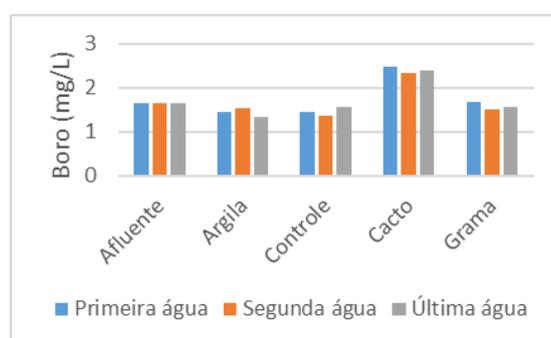
(i) Cálcio

(j) Magnésio



(k) Potássio

(l) Cloreto



(m) Boro

Fonte: O autor (2019)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Todos os telhados neutralizaram o pH da água escoada. Os telhados de controle e com argila expandida tiveram esse efeito mais atenuado pela possível dissolução de carbonato de cálcio do cimento e impermeabilizante presentes na laje, esse efeito foi atenuado nos demais telhados pelas camadas de substrato e vegetação.

Os telhados verdes foram fontes de nitrato, amônia e boro. Por outro lado, todos os telhados retiveram sulfato e cloreto., apenas o telhado verde com Coroa-de-Frade superou os parâmetros para as variáveis potássio e fosfato.

A partir do experimento com água da chuva em comparação com os limites recomendados para águas com fins de irrigação, todas as variáveis de qualidade da água analisadas do telhado verde com grama esmeralda, o telhado marrom com argila expandida e o telhado de controle se enquadram nos limites recomendados, desta forma o sistema é autossuficiente hidricamente no contexto de qualidade da água. Já para o telhado verde com Coroa-de-Frade as variáveis fosfato e potássio encontraram fora dos limites estabelecidos para irrigação necessitando de um tratamento posterior para utilização para irrigação.

Considerando as possíveis formas de tratamento e os resultados da análise por amostragem em diferentes tempos de um mesmo evento de precipitação, um sistema em série com um desviador de primeiras águas e um filtro de areia com carvão ativado são boas alternativas para mitigar a concentração de fosfato e potássio e torna-los aptos para utilização em irrigação.

A avaliação da umidade antecedente aos experimentos não apresentou grandes diferenças nos resultados. A intensidade da chuva teve influência nas variáveis turbidez, nitrato e fosfato.

5.1 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Recomenda-se continuar estudando a qualidade da água da chuva em telhados ecológicos em Recife a fim de avaliar o efeito da sazonalidade e de variáveis como temperatura e dias anteriores secos. Ainda, sugere-se:

- Investigar o uso de técnicas de pós tratamento para adequar todas as variáveis de qualidade da água para o telhado verde com Coroa-de-Frade;

- Modificar o sistema de simulação de chuva a fim de identificar a influência de diferentes intensidades na qualidade da água;
- Realizar análises microbiológicas, cloro residual livre e cor aparente para e, caso necessário, investigar técnicas de pós-tratamento para enquadrar a água dos telhados ecológicos na NBR 15.527 e utilizá-la para outros fins não nobres.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457 – **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização**. 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13969 – **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação**.1997.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15527. **Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. 2007.

AITKENHEAD-PETERSON, J. A.; DVORAK, B. D.; VOLDER, A.; STANLEY, N. C. Chemistry of growth medium and leachate from green roof systems in south-central Texas. **Urban Ecosystems**, v. 14, n. 1, p. 17–33, 10 mar. 2011.

ALI, N. S.; MO, K.; KIM, M. A case study on the relationship between conductivity and dissolved solids to evaluate the potential for reuse of reclaimed industrial wastewater. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 16, n. 5, p. 708–713, 29 jul. 2012.

ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and greenroofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, p. 480-493, out. 2008.

ALMEIDA, A. J. G. A.; ARAÚJO, L. F.; SILVA, S. T. B.; SANTOS, S. M.; GAVAZZA, S. Avaliação de desempenho de distintos dispositivos para desvio automático dos primeiros milímetros da água de chuva. In: Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água de Chuva. Belém. **Anais [...]** Belém: ABCMAC, 2016.

ALMEIDA, O. A. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas/BA: EMBRAPA, 2010.

APHA – American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21th ed., Washington DC, 2005.

ARAÚJO, L. F. **DesviUFPE como barreira sanitária para melhoria da qualidade de água de chuva em zona rural**: determinação de deposição seca e melhoria de desempenho. 2017. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Campina Grande: Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 1999.

BANG, J.; HESTERBERG, D. Dissolution of Trace Element Contaminants from Two Coastal Plain Soils as Affected by pH. **Journal of Environment Quality**, v. 33, n. 3, p. 891, 2004.

BEECHAM, S.; RAZZAGHMANESH, M. Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. **Water Research**, v. 70, p. 370–384, 1 mar. 2015.

BERARDI, U.; GHAFARIANHOSEINI, A.; GHAFARIANHOSEINI, A. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. **Applied Energy**, v. 115, p. 411–428, 15 fev. 2014.

BERNDTSSON, J. C.; EMILSSON, T.; BENGTSSON, L. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. **Science of The Total Environment**, v. 355, n. 1–3, p. 48–63, 15 fev. 2006.

BERNDTSSON, J. C.; BENGTSSON, L.; JINNO, K. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. **Ecological Engineering**, v. 36, p. 351–360, 2009.

BERNDTSSON, J. C. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. **Ecological Engineering**, v. 36, n. 4, p. 351–360, 1 abr. 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria 2.914, de 12 de dezembro de 2011**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em 13 maio 2019.

BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality. **Ecological Engineering**, v. 91, p. 506–514, 1 jun. 2016.

CARDOSO, G. T.; VECCHIA, F. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. **Journal of Construction Engineering**, v. 2013, p. 1–7, 2013.

CARPENTER, C. M. G.; TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; MONTESDEOCA, M. Water quantity and quality response of a green roof to storm events: Experimental and monitoring observations. **Environmental Pollution**, v. 218, p. 664–672, nov. 2016.

CARVALHO, J. R. S.; LUZ, J.; SANTOS, S. M.; GAVAZZA, S. A PVC-pipe device as a sanitary barrier for improving rainwater quality for drinking purposes in the Brazilian semiarid region. **Journal of Water and Health**, v. 16.3, p. 391–402, 2018.

CETESB. **Drenagem urbana: manual de projeto**. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, São Paulo, 464 p., 1986.

CHAI, H.; TANG, Y.; SU, X.; WANG, W.; LU, H.; SHAO, Z.; HE, Q. Annual variation patterns of the effluent water quality from a green roof and the overall impacts of its structure. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 30, p. 30170–30179, 27 out. 2018.

CHEN, C. F.; KANG, S.-F.; LIN, J.-H. Effects of recycled glass and different substrate materials on the leachate quality and plant growth of green roofs. **Ecological Engineering**, v. 112, p. 10–20, 1 mar. 2018.

CONNELLY, M.; HODGSON, M. Sound transmission loss of green roofs. In: 6th Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference. Baltimore. **Anais [...]** 2008

CONNELLY, M.; HODGSON, M. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. **Applied Acoustics**, v. 74, n. 10, p. 1136–1143, 1 out. 2013.

CORDEIRO, G. G. **Salinidade e sodicidade dos solos agrícolas**. Petrolina/PE, EMBRAPA-CPATSA, 1983.

COUTINHO, A. P.; LEITE, L. L. L.; RIBAS, L. V.; ANTONINO, A. C. D.; CABRAL, J. J. S. P.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Coletânea de equações de chuvas intensas para o estado de Pernambuco. **Anais [...]** do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, 7 p., 2013.

COUTINHO, A. P.; SILVA, F. B. SILVA, R. O. ANTONINO, A. C. D. MONTENEGRO, S. M. G. L. Determinação de Equações de Chuvas Intensas para Municípios das Mesorregiões do Estado de Pernambuco Com Dados Pluviométricos. **Anais [...]** do Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Fortaleza, 14 p., 2010.

DUNNETT, N.; NAGASE, A.; HALLAM, A. The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth. **Urban Ecosystems**, v. 11, n. 4, p. 373–384, 11 dez. 2008.

EMCIBRA S. A. ENGENHARIA DE CONSULTORIA. Plano diretor de drenagem urbana para a cidade do Recife, disponível impresso na EMLURB, Recife, 1978.

FARIAS, M. M. M. W. E. C. **Aproveitamento de águas de chuva por telhados**: aspectos quantitativos e qualitativos. 2012. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

FERRANS, P.; REY, C. V.; PÉREZ, G.; RODRÍGUEZ, J. P.; DÍAZ-GRANADOS, M. Effect of Green Roof Configuration and Hydrological Variables on Runoff Water Quantity and Quality. **Water**, v. 10, n. 7, p. 960, 20 jul. 2018.

GILL, S. E.; HANDLEY, J. F.; ENNOS, R.; PAULEIT, S. Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. **Built Environment**, v. 33, n. 1, p. 115–133, 13 mar. 2007.

HOSKING, J. R. M.; WALLIS, J. R.; WOOD, E. F. Estimation of the generalized-extreme-value distribution by the method of probability weighted moment. **Technometrics**, v. 27, n. 3, 1985.

GUARULHOS. Prefeitura Municipal. Lei Municipal nº 7.031, de 17 de abril de 2012. **Dispõe sobre a instalação do "telhado verde" nos locais que especifica, e dá outras providências**. Disponível em: <<https://leismunicipais.com.br/a/sp/g/guarulhos/lei-ordinaria/2012/703/7031/lei-organica-guarulhos-sp>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

GUPTA, U. C.; JAME, Y. W.; CAMPBELL, C. A.; LEYSHON, A. J.; NICHOLAICHUK, W.. Boron toxicity and deficiency: a review. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 65, n. 3, p. 381–409, ago. 1985.

HASHEMI, S. S. G.; MAHMUD, H. BIN; ASHRAF, M. A. Performance of green roofs with respect to water quality and reduction of energy consumption in tropics: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 52, p. 669–679, 1 dez. 2015.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157–164, 1 jul. 2012.

JOÃO PESSOA. Prefeitura Municipal. Lei Municipal nº 10.047 de 09 de julho de 2013. **Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "Telhado Verde" nos locais que especifica, e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/56458222/doespb-10-07-2013-pg-3>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

KARACHALIOU, P.; SANTAMOURIS, M.; PANGALOU, H. Experimental and numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 256–264, 15 fev. 2016.

KARCZMARCZYK, A.; BUS, A.; BARYŁA, A. Phosphate Leaching from Green Roof Substrates - Can Green Roofs Pollute Urban Water Bodies? **Water**, v. 10, n. 2, p. 199, 13 fev. 2018.

KATZ, R. W.; PARLANGE, M. B. NAVEAU, P. Statistics of extremes in hydrology. **Advances in Water Resources**, v. 45, n. 8-12, p. 1287-1304, 2002.

KLEIN P. M.; COFFMAN R. Establishment and performance of an experimental green roof under extreme climatic conditions. **Science of the Total Environment**, v. 512-513, n. 5, p. 82–93., abr. 2015.

KÖHLER, M.; KSIAZEK-MIKENAS, K. Green Roofs as Habitats for Biodiversity. **Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability**, p. 239–249, 1 jan. 2018.

- KUOPPAMÄKI, K.; HAGNER, M.; LEHVÄVIRTA, S.; SETÄLÄ, H. Biochar amendment in the green roof substrate affects runoff quality and quantity. **Ecological Engineering**, v. 88, p. 1–9, 1 mar. 2016.
- KUOPPAMÄKI, K.; LEHVÄVIRTA, S. Mitigating nutrient leaching from green roofs with biochar. **Landscape and Urban Planning**, v. 152, p. 39–48, 1 ago. 2016.
- LA ROCHE, P.; BERARDI, U. Comfort and energy savings with active green roofs. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 492–504, 1 out. 2014.
- LIMA, J. C. A. L. **Avaliação do desempenho de dispositivo de desvio das primeiras águas de chuva utilizado em cisternas no semiárido pernambucano**. 2012. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2012.
- LIMA, V. L. A.; CHAVES, L. H. G. **Qualidade da água**. Campina Grande: Gráfica Agenda, 2008.
- LIMA, G. C. O. **Avaliação do desempenho de telhados verdes: capacidade de retenção hídrica e qualidade de água escoada**. 2013. 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2013.
- MAGAROTTO, M. G.; COSTA, M. F.; TENEDÓRIO, J. A.; SILVA, C. P. Vertical growth in a coastal city: an analysis of Boa Viagem (Recife, Brazil). **Journal of Coastal Conservation**, v. 20, n. 1, p. 31–42, 26 fev. 2016.
- MALAVOLTA, E. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, p. 315, 1997.
- MCNEIL, V. H.; COX, M. E. Relationship between conductivity and analysed composition in a large set of natural surface-water samples, Queensland, Australia. **Environmental Geology**, v. 39, n. 12, p. 1325–1333, 14 nov. 2000.
- MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? **Landscape and Urban Planning**, v. 77, n. 3, p. 217–226, 30 ago. 2006.
- MORGAN, S.; ALYASERI, I.; RETZLAFF, W. Suspended Solids in and Turbidity of Runoff from Green Roofs. **International Journal of Phytoremediation**, v. 13, n. S1, p. 179-193, 2011.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007, 552 p., 2007.
- PEÇKOWSKI, G.; KOWALCZYK, T.; SZAWERNOGA, K.; ORZEPOWSKI, W. Hydrological Performance and Runoff Water Quality of Experimental Green Roofs. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1185, 4 set. 2018.

PREFEITURA DO RECIFE, **Estudo e Concepção do Plano de Manejo de Águas Pluviais do Recife – PDDR**. Disponível na EMLURB. Recife, 2016.

QIN, X.; WU, X.; CHIEW, Y.-M.; LI, Y. A Green Roof Test Bed for Stormwater Management and Reduction of Urban Heat Island Effect in Singapore. **British Journal of Environment and Climate Change**, v. 2, n. 4, p. 410–420, 19 jan. 2013.

RAMOS, M. A.; AZEVEDO, J. R. G. Nova equação de chuvas intensas para a cidade de Recife-Pernambuco. **Anais [...] do X Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Fortaleza, xx p., 2010.

RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; KAZEMI, F. Impact of green roofs on stormwater quality in a South Australian urban environment. **Science of The Total Environment**, v. 470-471, n. 1, p. 651-659, 2014.

RECIFE. Prefeitura Municipal. Lei Municipal nº 18.112, de 12 de janeiro de 2015. **Dispõe sobre a melhoria da qualidade ambiental das edificações por meio da obrigatoriedade de instalação do "telhado verde", e construção de reservatórios de acúmulo ou de retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280138>>. Acesso em: 2 ago. 2019.

SANTAMOURIS, M. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, v. 103, p. 682–703, 2014.

SÃO PAULO. Prefeitura Municipal. Lei Municipal nº 16.277, de 5 de outubro de 2015. **Dispõe sobre a obrigatoriedade da instalação do "telhado verde" nos locais que especifica e dá outras providências**. Disponível em: <<https://www.radarmunicipal.com.br/legislacao/lei-16277>>. Acesso em: 9 jun. 2019.

SHAFIQUE, M.; KIM, R.; RAFIQ, M. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, p. 757–773, 1 jul. 2018.

SILVA, R. S.; ARAÚJO, G. R. S. Algoritmo para determinação da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 5, p. 1371-1383, 2013.

SILVA, S. T. B.; ARAÚJO, L. R.; ALMEIDA, A. J. G. A.; GAVAZZA, S.; SANTOS, S. M. Comportamento de dispositivos de desvio das primeiras águas de chuva como barreiras sanitárias para proteção de cisternas. **Águas Subterrâneas**, v. 31, n. 2, p. 1-11, 2017.

SILVA, T. F. **Tecnologia alternativa em drenagem urbana: telhado verde**. 2017. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

SOUZA, A. C. L. A. **Avaliação do escoamento superficial após a implementação de telhados verdes em Recife-PE**. 2019. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Pernambuco, 2019.

SUKREEYAPONGSE, O.; HOLM, P. E.; STROBEL, B. W.; PANICHSAKPATANA, S.; MAGID, J.; HANSEN, H. C. pH-Dependent Release of Cadmium, Copper, and Lead from Natural and Sludge-Amended Soils. **Journal of Environment Quality**, v. 31, n. 6, p. 1901, 2002.

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503-527, 2003.

TODOROV, D.; DRISCOLL, C. T.; TODOROVA, S.; MONTESDEOCA, M. Water quality function of an extensive vegetated roof. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 928–939, 1 jun. 2018.

TUCCI, C. E. M. (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

VERSINI, P.-A.; JOUVE, P.; RAMIER, D.; BERTHIER, E.; GOUVELLO, B. Use of green roofs to solve storm water issues at the basin scale – Study in the Hauts-de-Seine County (France). **Urban Water Journal**, v. 13, n. 4, p. 372–381, 18 maio 2016.

VIJAYARAGHAVAN, K.; JOSHI, U. M. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. **Environmental Pollution**, v. 194, p. 121–129, 1 nov. 2014.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: introdução à qualidade das águas ao tratamento de esgotos**. 1. ed. Belo Horizonte/MG: Editora DESA-UFGM, 1995.

WALTON, N. R. G. Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids—What is Their Precise Relationship? **Desalination**, v. 72, n. 3, p. 275–292, 1 dez. 1989.

WANG, H.; QIN, J.; HU, Y. Are green roofs a source or sink of runoff pollutants? **Ecological Engineering**, v. 107, p. 65–70, 1 out. 2017.

YANG, J.; YU, Q.; GONG, P. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 31, p. 7266–7273, 1 out. 2008.

ZHANG, Q.; MIAO, L.; WANG, X.; LIU, D.; ZHU, L.; ZHOU, B.; SUN, J.; LIU, J. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. **Landscape and Urban Planning**, v. 144, p. 142–150, 1 dez. 2015.