

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Kelly Silva dos Santos

**INFLUÊNCIAS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO DESEMPENHO
DE UM *WETLAND* CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DE FUNDO
SATURADO**

Santa Maria, RS
2022

Kelly Silva dos Santos

**INFLUÊNCIAS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO DESEMPENHO DE UM
WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DE FUNDO SATURADO**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Delmira Beatriz Wolff

Santa Maria, RS
2022

Santos, Kelly Silva dos
INFLUÊNCIAS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO DESEMPENHO DE
UM WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DE FUNDO
SATURADO / Kelly Silva dos Santos.- 2022.
128 p.; 30 cm

Orientadora: Delmira Beatriz Wolff
Coorientadora: Rutineia Tassi
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2022

1. Wetland Construído 2. Evapotranspiração 3.
Equação de PenmanMonteith 4. Balanço hídrico 5.
Interceptação I. Wolff, Delmira Beatriz II. Tassi,
Rutineia III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, KELLY SILVA DOS SANTOS, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

Kelly Silva dos Santos

**INFLUÊNCIAS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO DESEMPENHO DE UM
WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DE FUNDO SATURADO**

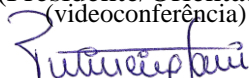
Dissertação apresentado ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Aprovada em 11 de fevereiro de 2022:



Delmira Beatriz Wolff, Dra. (UFSM)

(Presidente/Orientadora)
(videoconferência)



Rutinéia Tassi, Dra. (UFSM)

(Coorientadora)
(videoconferência)



Paula Loureiro Paulo, PhD. (UFMS)

(videoconferência)



Vanessa Sari, Dra. (UFSM)

(videoconferência)

Santa Maria, RS
2022

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, meu pai, meus irmãos e minha irmã, obrigada pelo apoio, amor e compreensão da minha ausência em muitos momentos.

À minha orientadora, professora Dra. Delmira Beatriz Wolff, obrigada pelos ensinamentos e pela oportunidade de trabalhar no que mais gosto.

À minha coorientadora, professora Dra. Rutinéia Tassi, obrigada pelos conhecimentos, paciência e contribuição no tema e elaboração deste estudo.

À banca, professora PhD. Paula Loureiro Paulo e a professora Dra. Vanessa Sari, obrigada pelas sugestões e contribuições na elaboração deste estudo.

Ao meu namorado Natanael Rodrigues, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos difíceis nesta jornada do mestrado.

Ao meu amigo e colega Rolando, obrigada pelo apoio, ajuda e conselhos nos momentos que mais precisei, eu não teria conseguido terminar este trabalho sem você. Você me inspira.

Aos meus amigos, Caroline, Marília, Yamil, Gabriela e Vithor, obrigada por todo apoio psicológico, pelos conselhos e paciência nos momentos difíceis. Vocês tornaram esta jornada mais agradável e divertida.

Aos meus amigos e colegas, Cácio, Lizet, Bruna, Bruno, Brenda, Carine, Bárbara e Andrieli, obrigada pelo apoio e pela ajuda para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Engenharia de Meio Ambiente, obrigada pelos equipamentos e pelo espaço cedido para realização das análises.

À PROINFRA, setor de elétrica, hidráulica, paisagismo e construção civil, pelo apoio na manutenção do sistema experimental.

À Universidade Federal de Santa Maria, pelo acolhimento e pelo ensino de qualidade.

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

A todos de que contribuíram de alguma forma para que este trabalho fosse realizado.

Quem se arrisca a andar por ares nunca antes respirados ou pensar fora da curva tem grandes chances de encontrar pedras no caminho. No entanto, ninguém é digno de contribuir para a ciência se não usar suas dores e insônias nesse processo. Não há céu sem tempestade. Risos e lágrimas, sucessos e fracassos, aplausos e vaias fazem parte do currículo de cada ser humano, em especial daqueles que são apaixonados em produzir novas ideias.

(Augusto Cury)

RESUMO

INFLUÊNCIAS DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS NO DESEMPENHO DE UM WETLAND CONSTRUÍDO DE FLUXO VERTICAL DE FUNDO SATURADO

AUTORA: Kelly Silva dos Santos
ORIENTADORA: Delmira Beatriz Wolff

Alguns processos hidrológicos que ocorrem em sistemas de *wetlands* construídos (WCs) são considerados de difícil determinação e, conseqüentemente, existem poucos estudos sobre o assunto. A evapotranspiração e a interceptação são variáveis importantes em WCs, pois as condições climáticas variam, significativamente, em diferentes locais da aplicação desses sistemas, uma vez que as variáveis meteorológicas atuam diretamente no tratamento do efluente. Este trabalho teve como objetivo avaliar a interceptação da chuva e a evapotranspiração e suas influências na eficiência do tratamento de um *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS), com 0,30 m de saturação, uma área superficial de 24,5 m² e com vegetação *Canna x generalis*. A macrófita foi monitorada durante seu desenvolvimento em dois diferentes ciclos (C1 e C2) com o sistema operando com uma TAH de 54,1 mm d⁻¹ e 33,7 mm d⁻¹ ao longo do C1 e C2, respectivamente. A *Canna x generalis* apresentou boa adaptação e rápido crescimento, propiciando a elevadas taxas de evapotranspiração e interceptação em ambos os ciclos. O desenvolvimento da macrófita no C2 foi mais lento, embora ocorra elevada incidência de precipitação (P). No C1 a área foliar (A_c) e o índice de área foliar (IAF) da *Canna x generalis* atingiram 5393 cm² e 41 m² m⁻², enquanto no C2 foram de 3075 cm² e 21,25 m² m⁻². O bom desenvolvimento da vegetação no C1 corroborou para um total de interceptação (I) de 79,6% de P, precipitação interna (P_i) de 18,9% de P e escoamento pelo tronco (E_{tr}) de 1,7% de P. Para o C2, o total de I foi de 61,5% de P, P_i de 35,5% de P e E_{tr} de 2,92% de P. Em relação à perda de água, os dois ciclos resultaram em uma evapotranspiração de referência (ET₀) média (obtida pela equação de Penman-Monteith) de 3,94 mm d⁻¹, determinada a partir de dados meteorológicos do local. A evapotranspiração de cultura (ET_c) determinada por balanço hídrico (diferença de entradas e saídas) foi aproximadamente 74% superior para essas condições climáticas, resultando em uma taxa de 6,84 mm d⁻¹. No total, a perda líquida atribuída à ET_c foi de 27% do volume de entrada no WCV-FS. A evaporação medida no local pelo tanque classe A (TCA) foi superior à ET₀ em sua maioria. A partir desse monitoramento foram determinados os coeficientes de cultura (K_c) e do TCA (K_t). O K_c médio observado foi de 1,98 e 1,81 para o C1 e C2, respectivamente, com valor máximo de K_c em dezembro/20 e início de janeiro/21, período este caracterizado pela fase de desenvolvimento avançado da vegetação. Os K_t médio foi de 1,53 e 1,2 para o C1 e C2, respectivamente. A influência de dias chuvosos e de dias com perda de água por evapotranspiração possibilitaram eficiências de remoção de concentração de DQO_t média de 83% em dias secos, devido a evapotranspiração, e de 87% em dias após eventos chuvosos, em função da diluição da carga orgânica.

Palavras-chave: *Wetlands* construídos. Evapotranspiração. Penman-Monteith. Balanço hídrico. Interceptação.

ABSTRACT

INFLUENCES OF HYDROLOGICAL PROCESSES ON THE PERFORMANCE OF A VERTICAL FLOW CONSTRUCTED WETLAND FROM SATURATED BOTTOM

AUTHOR: Kelly Silva dos Santos

ADVISOR: Delmira Beatriz Wolff

Hydrological processes that occur in constructed wetland study systems (CWs) are considered difficult to determine and, consequently, there are few on the subject. Evapotranspiration and different local variables in CWs as local and fluent conditions vary significantly in local and fluent variables in weather systems since as applications local variables are not affected by the treatment. This study aimed to evaluate the interception of rain and evapotranspiration and their influence on the treatment efficiency of a vertical flow constructed wetland from saturated bottom (VSFCW), with 0.30 m of saturation, a surface area of 24.5 m² and with *Canna x generalis*. The macrophyte was monitored during its development in two different cycles (C1 and C2) with the system operating with a HLR of 54.1 mm.d⁻¹ and 33.7 mm.d⁻¹ along the C1 and C2, respectively. *Canna x generalis*. Good adaptation and rapid growth, providing high rates of evapotranspiration and interception in both cycles. The development of the non-C2 macrophyte was slower, although it may be less than the increase in slowness (P). In C1, the leaf area (A_l) and the leaf area index (LAI) of *Canna x generalis* reached 5393 cm² and 41 m².m⁻², while in C2 they were 3075 cm² and 21.25 m².m⁻². The good development of vegetation in C1 corroborated to a total interception (I) of 79.6% of P, internal precipitation (P_i) of 18.9% of P and trunk runoff (E_t) of 1.7% of P. For C2, the total of I was 61.5% of P, P_i of 35.5% of P and E_t of 2.92% of P. Regarding the loss of water, the two cycles resulted in an evapotranspiration reference (ET₀) average (obtained by the Penman-Monteith equation) of 3.94 mm.d⁻¹, determined from local meteorological data. Crop evapotranspiration (ET_c) determined by an inlet and outlet water balance (74% higher than climatic conditions ET_c) was approximately 74% higher than climatic conditions, resulting in approximately 84 mm.d⁻¹. In total, a net loss attributed to ET_c was 27% of the volume entering the VSFCW. The evaporation measured on site by the class A tank (TCA) was mostly higher than ET₀. Based on this monitoring, the crop (K_c) and TCA (K_t) coefficients were determined. The average K_c was observed at 1.98 and 1.81 for C1 and C2, respectively, with a maximum value of K_c in December/20 and early January/21, a period predicted by the advanced development phase of the next one. The mean K_t was 1.53 and 1.2 for C1 and C2, respectively. The inspiration strength of rainy days and days with water loss by evapotranspiration average COD removal efficiencies of 83% on dry days, due to evapotranspiration, and after 87% on days of evapotranspiration, due to organic load dilution events.

Keywords: Constructed wetlands. Evapotranspiration. Penman-Monteith. Hydric balance. Interception.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_c	Área foliar da <i>Canna x generalis</i>
A_{sup}	Área Superficial
ANA	Agência Nacional das Águas
APHA	American Public Health Association
C	Comprimento
CEU	Casa do Estudante Universitário
C1, C2	Ciclo de desenvolvimento da vegetação
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DQO_t	Demanda Química de Oxigênio Total
e_a	Pressão de Vapor Real
e_s	Pressão de Vapor de Saturação
E	Evaporação
E_t	Escoamento pelo Tronco da Vegetação
E_{tan}	Evaporação do Tanque Classe A
ET	Evapotranspiração
ETC	Evapotranspiração de Cultura
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
ETR	Evapotranspiração Real
ET0	Evapotranspiração de Referência
FAO	Food and Agriculture Organization
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
G	Fluxo de Calor do Solo
I	Interceptação
IAF	Índice de Área Foliar
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K_c	Coeficiente de Cultura
K_t	Coeficiente do Tanque Classe A
L	Largura
$L d^{-1}$	Litros por dia
LEMA	Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente
MO	Matéria orgânica
m	Metros
m^2	Metros quadrados
mL	Mililitros
mm	Milímetros
$mm d^{-1}$	Milímetros por dia
NBR	Norma Brasileira
NF	Número de Folhas
NT	Nitrogênio Total
P_{atm}	Pressão Atmosférica

P_i	Precipitação Interna
P	Precipitação Total ou Incidente
Q_a	Vazão Afluente
Q_e	Vazão Efluente
R_n	Radiação Líquida
R_s	Radiação Solar
RENTED	Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
T_a	Temperatura Média Anual
T	Temperatura
TAH	Taxa de Aplicação Hidráulica
TAS	Taxa de Aplicação Superficial
TCA	Tanque Classe A
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
TS	Tanque Séptico
u_2	Velocidade do Vento à 2m
UFMS	Universidade Federal de Santa Maria
UR	Umidade Relativa
V_v	Velocidade do Vento
WC	<i>Wetland</i> Construídos
WCV-FS	<i>Wetland</i> Construído de Fluxo Vertical de Fundo Saturado
WCVD	<i>Wetland</i> Construído de Fluxo Vertical Descente
WCFH	<i>Wetland</i> Construído de Fluxo Horizontal
WC	<i>Wetland</i> Construídos
%	Porcentagem
γ	Constante Psicométrica
Δ	Declividade da Curva de Vapor de Saturação
$\underline{\Delta S}$	Variação de Armazenamento de Água

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1	CICLO HIDROLÓGICO	17
3.1.1	Interceptação da chuva	18
3.1.2	Evapotranspiração	20
3.2	WETLANDS CONSTRUÍDOS	24
3.2.1	Wetland construído de fluxo vertical descendente (WCVD).....	27
3.2.2	Aspectos hidrológicos em wetlands construídos.....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	41
4.1	LOCALIZAÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL	41
4.2	DESCRIÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL.....	42
4.2.1	Condição operacional.....	45
4.3	MONITORAMENTO QUANTITATIVO	46
4.3.1	Vazão	46
4.3.2	Precipitação incidente (P)	47
4.3.3	Precipitação interna (Pi)	48
4.3.4	Escoamento pelo tronco (E_t)	51
4.3.5	Interceptação (I)	54
4.3.6	Evapotranspiração (ET)	55
4.4	MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO	59
4.5	MONITORAMENTO QUALITATIVO	61
4.5.1	Eficiência do tratamento	62
4.6	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1	CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS.....	64
5.2	INTERCEPTAÇÃO DE MACRÓFITAS EM WCV-FS	66
5.3	COMPORTAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO WCV-FS	71
5.3.1	Evapotranspiração da <i>Canna x generalis</i> no WCV-FS	71
5.3.2	Taxas de evapotranspiração de referência e de evaporação diária	78

5.3.3	Coefficiente de cultura e de TCA	83
5.4	MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO	85
5.4.1	Desenvolvimento da <i>Canna x generalis</i>	85
5.4.2	Área foliar da <i>Canna x generalis</i>	92
5.4.3	Índice da área foliar da <i>Canna x generalis</i>	96
5.5	DESEMPENHO DO WCV-FS EM TERMOS DE DQO	99
6	CONCLUSÃO	107
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A – DADOS PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTURA E COEFICIENTE DE TANQUE CLASSE A	123
	APÊNDICE B – DADOS MONITORADOS PARA ESTIMATIVA DA INTERCEPTAÇÃO	126
	APÊNDICE C – MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO	127
	APÊNDICE D – CONCENTRAÇÃO DE DQO	128

1 INTRODUÇÃO

O acesso ao saneamento básico é um grande problema mundial, com apenas 78% da população com acesso a estes serviços (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020). No Brasil, essa situação não é diferente, sendo o tratamento de esgotos o serviço de saneamento básico com maior déficit no atendimento. Em 2020, apenas 50,8% dos esgotos gerados foram tratados e em torno de 63,2% da população urbana teve acesso à coleta de esgoto (SNIS, 2021). E apesar das melhorias implantadas ao longo dos anos, ainda há muito a evoluir para alcançar a universalização do esgotamento sanitário até o ano 2033 em todo o Brasil (UNITED NATIONS, 2005; BRASIL, 2013), previsto nas metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e no Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB).

De fato, a universalização dos serviços de saneamento é fator dependente das prioridades da administração pública, uma vez que o baixo índice de atendimento de tratamento de esgotos tem alavancado diversos problemas ambientais, como degradação dos corpos hídricos e danos ao meio aquático, bem como inúmeros problemas de saúde pública (LIBÂNO; CHERNICHARIO; NASCIMENTO, 2005).

Por este motivo, tem-se aumentado a busca por alternativas tecnológicas de baixo custo e simplificadas que auxiliem nos processos de tratamento, como, por exemplo, algumas alternativas de tratamento descentralizado. Esses sistemas oferecem opções de investimentos em etapas (MORAIS *et al.*, 2015), sendo considerados uma solução viável para pequenas cidades, comunidades e povoados, sítios turísticos, estabelecimentos industriais e comerciais (HOFFMANN *et al.*, 2013) ou, ainda, adequado para locais distantes de sistemas de tratamento convencionais em centros urbanos.

Os *wetlands* construídos (WCs) constituem uma alternativa que utiliza elementos naturais em relação aos métodos convencionais de tratamento de efluente, sendo empregados como uma opção de tratamento descentralizado. Estes sistemas naturais permitem a interação entre seus componentes como plantas, material filtrante e microrganismos no tratamento de efluentes domésticos (VYMAZAL, 2005) e, além disso, são adequados para realizar tratamento secundário e terciário de efluentes (BRASIL *et al.*, 2007; BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014). No entanto, a compreensão da interação entre esses componentes nas águas residuais ainda precisa avançar. Assim, torna-se necessário ampliar estes estudos no Brasil, com suas influências climáticas por região.

Grande parte dos estudos desenvolvidos em WCs são para avaliar os aspectos qualitativos, mas ainda pouco se sabe sobre os aspectos quantitativos influenciados pelos

processos hidrológicos, tais como a evapotranspiração (ET) e a interceptação (I). Von Sperling e Sezerino (2018) recomendam considerar o cálculo do balanço hídrico na avaliação das eficiências de remoção provenientes destes sistemas.

As perdas de água nos sistemas do tipo WC ocorrem principalmente pelos efeitos combinados de evaporação de águas superficiais e pela transpiração de plantas (KADLEC; WALLACE, 2009). Entretanto, é impossível controlar as alterações no fluxo volumétrico atribuídas à ET, as quais podem alterar o desempenho do tratamento do WC, transportando a água para fora do sistema e aumentando as concentrações de parâmetros dissolvidos (BEBEE et al., 2014).

De acordo com os objetivos propostos pelo tratamento torna-se fundamental a estimativa da perda de água para o dimensionamento de WCs (HEADLEY *et al.*, 2012; GREENWAY, 2005). Magalhães Filho *et al.* (2018) ressaltam que em países de clima quente, a ET significa perda de recurso hídrico, principalmente quando o efluente é destinado ao reuso.

Outro processo importante que ocorre em WCs plantados é a interceptação realizada pelas plantas, que retém e redistribuem ao longo do tempo a água precipitada. A interceptação vegetal pode chegar a 25% do valor da precipitação anual (TUCCI, 2007), dependendo da intensidade de precipitação, da espécie da planta e das condições meteorológicas (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000). Porém, ainda são incipientes as informações encontradas na literatura em relação à evapotranspiração e à interceptação em sistemas *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS). Sendo assim, torna-se fundamental a realização de pesquisas para quantificar as taxas de ET e de I em WCs, na tentativa de otimizar o tratamento de esgotos domésticos em residências.

Neste sentido, esta pesquisa teve como objetivo monitorar e avaliar a influência dos processos hidrológicos em um sistema de tratamento de esgoto doméstico do tipo *wetland* construído vertical de fundo saturado. Este sistema de tratamento foi implementado pelo projeto denominado Rede Nacional de Tratamento de Esgotos Descentralizados (RENTED), financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) no Edital Chamadas Públicas MCT/Finep/Ação Transversal Saneamento Ambiental e Habitação 06/2010, do qual um dos participantes foi a Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Na UFSM foi instalada, está ainda em operação e avaliação, desde 2015, uma estação experimental composta por tanque séptico seguido de *wetland* construído de fluxo vertical descendente (WCVD), destinada ao tratamento de esgoto doméstico não segregado.

Dentre os trabalhos já realizados neste projeto, destacam-se: trabalhos de graduação (PERONDI, 2016; RAMÍREZ, 2017; FACCENDA, 2017; SANTOS, 2018; BURLET, 2018;

MANGANELLI, 2018; FREO, 2020) dissertações de mestrado (DECEZARO, 2016; ALVES, 2016; TREVISAN, 2017; GOERCK, 2018; RAMÍREZ, 2019) e tese de doutorado (ARAUJO, 2018; DECEZARO, 2018). Na sequência das pesquisas com Wetland vertical de fundo saturado, foram concluídos os trabalhos de graduação (ARRUDA, 2019) e dissertação de mestrado (MARCHIORO, 2020).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os processos hidrológicos de interceptação da chuva e de evapotranspiração e suas influências em um sistema de tratamento de efluente doméstico do tipo *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos propostos são:

- Quantificar a interceptação da precipitação em diferentes fases de desenvolvimento da *Canna x generalis*;
- Avaliar e quantificar as perdas de água referentes à evapotranspiração do WCV-FS nos diferentes estágios de desenvolvimento das plantas *Canna x generalis*, a partir do balanço hídrico;
- Relacionar a evapotranspiração de cultura com a evapotranspiração de referência, calculando coeficientes de cultura para a *Canna x generalis*, ao longo do monitoramento;
- Avaliar a influência da precipitação e da evapotranspiração quanto à eficiência do tratamento no WCV-FS.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico é o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera (SILVEIRA, 2002; TUCCI, 2002), bem como o movimento da água dos oceanos para a atmosfera (DODDS; WHILES, 2020). Como pode ser observado na Figura 1, este ciclo possui uma dinâmica impulsionada pela energia solar e eólica (BRAGA *et al.*, 2005), associada à gravidade e à rotação terrestre (TUCCI; MENDES, 2006), ocorrendo a partir da combinação de alguns fatores responsáveis pela mudança do estado físico da água e do transporte, este sendo aéreo, superficial ou subsuperficial (WARD; TRIMBLE, 2004). A quantidade e a velocidade com que a água circula nas diferentes fases do ciclo hidrológico é influenciada por fatores como cobertura vegetal, altitude, topografia, temperatura, tipo de solo e geologia (CARVALHO; SILVA, 2006).

Figura 1 - Representação dos processos físicos do ciclo hidrológico



Fonte: Adaptado de Braga *et al.* (2005).

Os componentes constituintes deste ciclo são conhecidos como processos hidrológicos e entre os de maior importância estão: a condensação, a precipitação, a interceptação, a infiltração, a detenção, a percolação, os escoamentos superficiais e subsuperficiais, o escoamento subterrâneo, o escoamento fluvial e a evapotranspiração (KOBAYAMA; MOTA; CORSEUIL, 2008). Tais processos podem ser divididos em relação ao seu fluxo, conforme sua entrada e saída da superfície (TUCCI, 2007), sendo fundamentais na realização do balanço hídrico.

A energia solar é responsável por impulsionar o ciclo hidrológico, ocasionando a evaporação e o armazenamento do vapor de água da superfície terrestre na atmosfera. Conforme variam as condições atmosféricas, o vapor de água condensa e retorna à superfície terrestre como precipitação (MARTIN, 2008), sendo essa a principal entrada de água nessa superfície (TUCCI, 2007). Ao voltar ao solo, uma parcela dessa água pode infiltrar, de acordo com as características do solo, escoar superficialmente, chegando em rios, em lagos e em reservatórios (VON SPERLING, 2014), ou ainda, ser interceptada pelas copas das árvores, sendo parte dessa água retida pela massa vegetal, no processo denominado de interceptação (RODRIGUES *et al.* 2016).

A água interceptada pelo dossel vegetal retorna à atmosfera na forma de evapotranspiração, sem jamais ter alcançado o solo (MARTIN, 2008). A vegetação, portanto, atua no ciclo hidrológico por meio de processos como interceptação, infiltração, absorção, transpiração e percolação (CASTRO *et al.*, 1983).

3.1.1 Interceptação da chuva

A interceptação é caracterizada pela retenção da precipitação acima da superfície do solo, e ocorre em função da presença de vegetação ou de outra forma de obstrução ao escoamento (TUCCI, 2002); embora, a vegetação represente o agente interceptador mais importante (PENMAN, 1963). A interceptação vegetal é influenciada por fatores como: o tipo de precipitação (magnitude, intensidade e duração); o tipo de vegetação e sua estrutura; as condições meteorológicas (CROCKFORD; RICHARDSON, 2000; XIAO *et al.*, 2000) e; o estágio de desenvolvimento da vegetação.

O tipo de vegetação define a quantidade de gotas que cada folha pode reter, e a densidade da mesma indica o volume retido numa superfície. As folhas geralmente interceptam a maior parte de precipitação (TUCCI, 2002), sendo um fator de grande importância, uma vez que regulam a quantidade de água da precipitação efetiva que chega ao solo (RODRIGUES *et*

al., 2016) e facilmente se infiltra. O volume de água retido nas folhas, por sua vez, fica disponível para evaporar, minimizando o escoamento superficial e aumentando a capacidade de evaporação nas bacias hidrográficas (COLLISCHONN; TASSI, 2011).

Estudos tem demonstrado que, em bacias hidrográficas, a interceptação da vegetação contribui para a diminuição do escoamento superficial, auxiliando no controle da erosão e do assoreamento de cursos d'água (RODRIGUES *et al.*, 2016). Ou seja, minimiza os impactos que a precipitação pode ocasionar ao atingir o solo, atuando como regulador, na medida em que influencia na quantidade e na magnitude em que as águas são liberadas pelo ecossistema (SARI, 2011).

De modo geral, a interceptação da chuva aumenta com o aumento da precipitação, até a saturação da capacidade de armazenamento das folhas, principalmente diante de baixas intensidades de chuva. De fato, em período de chuva prolongada e contínua, a retenção da água na vegetação atinge seu máximo (BOCHET; RUBIO; POESEN, 1998; WANG *et al.*, 2012), escoando pelo tronco e, ao chegar no solo, a água infiltra até saturar os poros, ocasionando o escoamento superficial (TUCCI; CLARKE, 1997).

De acordo com Tucci (2002), o percentual interceptado pode chegar a 25% do valor da precipitação anual, conforme o tipo de vegetação existente no local. Alguns estudos realizados em reflorestamento de eucalipto, por exemplo, mostraram que a interceptação pelas copas variou entre 22 e 31% da precipitação anual (Alonso *et al.*, 2010). Esta variação pode ser ainda maior quando se trabalha com interceptação de vegetação de sub-bosque além da copa principal, como mostrado por Gordon *et al.* (2020), que observaram uma interceptação entre 11% e 59% da precipitação ao analisar herbáceas de sub-bosque de uma floresta de Pinus.

Para determinar a interceptação é necessário quantificar a precipitação efetiva que chega ao solo, representada pela soma da chuva que escoou pelos caules da vegetação e pela parcela que atravessa as folhas. A água interceptada pelas folhas tende a evaporar das copas devido à incidência da radiação solar (TUCCI, 2002). Dessa forma, a interceptação vegetal não pode ser determinada diretamente, podendo, no entanto, ser calculada, indiretamente, utilizando a equação da continuidade do sistema, conforme descrito na equação 1.

$$I = P - P_i - E_t \quad (1)$$

Em que: I é a precipitação interceptada (em mm); P é a precipitação total (em mm); P_i é a precipitação que atravessa as plantas (precipitação interna) (em mm) e; E_t é a parcela que escoo pelo tronco da vegetação (em mm).

A variável precipitação total (P) é quantificada através de postos localizados em clareiras próximas às áreas de interesse, distribuídos conforme o tipo de precipitação, o local e o grau de precisão desejado; sendo que os maiores problemas estão em locais onde há considerável altura da vegetação. Tucci (2002) salienta a importância da garantia da precisão na quantificação dessa variável, de maneira a evitar falsos resultados, em razão de que esses erros podem afetar outras variáveis envolvidas no procedimento.

A precipitação que atravessa a vegetação (P_i) é determinada por uma drenagem especial, disposta abaixo das árvores e distribuída de modo a obter uma representatividade espacial desta variável. Devido à grande variabilidade encontrada nos espaços e nas características da vegetação é necessário utilizar maior quantidade de equipamentos para medição deste parâmetro comparado a avaliação da precipitação incidente (TUCCI, 2002). Sari (2011) sugere que seja realizado sistema de rotação dos instrumentos de coleta, durante o processo de monitoramento, para assim garantir melhor representatividade da variabilidade e do processo de interceptação da vegetação.

O escoamento pelo tronco (E_t), segundo Tucci (2002), representa, de modo geral, apenas uma pequena parcela do total precipitado (de 1 a 15%). Sendo que, em muitos casos, está dentro da faixa de erros de amostragem e sua medição é somente viável para vegetação com tronco de magnitude razoável.

Usualmente, os valores da interceptação são determinados usando um grande número de coletores e uma grande área de coleta (CUARTAS, 2007; HOLWERDA; SCATENA; BRUIJNZEEL, 2006). Porém, esses monitoramentos de campo fornecem dados de alta precisão, também, em pequena escala (WU *et al.*, 2019).

A interceptação da chuva no dossel é um componente importante do balanço hídrico em um ecossistema terrestre, assim, uma estimativa precisa da interceptação de chuva pelo dossel da vegetação é muito relevante para os estudos de processos hidrológicos (ZHANG *et al.*, 2017). Também, são essenciais na gestão dos recursos hídricos (GALDOS *et al.*, 2012; MUZYLO *et al.*, 2009), especialmente em locais com grande quantidade de vegetação.

3.1.2 Evapotranspiração

A Evapotranspiração (ET) ocorre a partir da combinação de dois processos separados, conhecidos por evaporação (E) e transpiração (T). A evaporação é um processo pelo qual a água líquida é convertida em vapor de água (vaporização) e removida da superfície, podendo ocorrer em várias superfícies, tais como lagos, rios, pavimentação, solos e vegetação úmida. A transpiração, por sua vez, consiste na vaporização da água líquida contida nos tecidos das plantas e na remoção de vapor para a atmosfera. As culturas perdem a água, predominantemente, através dos estômatos, os quais consistem em pequenas aberturas nas folhas da planta, por onde passam gases e vapor de água (ALLEN *et al.*, 1998; VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008).

Devido à dificuldade de distinguir a ocorrência dos processos de E e T separadamente, já que ambos ocorrem simultaneamente (ALLEN *et al.*, 1998), a literatura menciona algumas formas de estimar a ET; sendo muito utilizadas as equações de balanço hídrico e suas variantes (KADLEC; WALLACE, 2009; TUCCI, 2007) ou ainda, a relação direta de ET com às variações meteorológicas (ALLEN *et al.*, 1998; KUMAR *et al.*, 2012).

O cálculo do balanço hídrico possibilita a estimativa da evapotranspiração real (ETR). A ETR é determinada, diretamente, apenas para pequenas áreas controladas, por meio de equipamento como lisímetros (de massa ou volumétricos), por meio de monitoramento contínuo das entradas por precipitação (P) e das saídas (Q_e) ao fundo de um tanque isolado nas laterais, a partir da verificação da massa de água percolada com auxílio de uma balança ou da quantificação do volume drenado abaixo do sistema radicular (TUCCI, 2007). Conforme a equação 2, a ETR seria determinada pela diferença entre os valores de P e Q_e .

$$ETR = P - Q_e \quad (2)$$

Em que: P é a precipitação incidente (em mm); Q_e é a vazão de saída (em mm).

Porém, deve-se considerar que alguns fatores podem afetar a ET, tais como os parâmetros climáticos, as características das culturas, o manejo e os aspectos ambientais (ALLEN *et al.*, 1998; VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008) conforme descrito a seguir:

- Parâmetros climáticos: radiação, temperatura do ar, umidade e velocidade do vento. O poder de E da atmosfera é expresso pela ET de culturas de referência (ET_0). A ET_0 representa a ET a partir da superfície com uma vegetação padrão;
- O tipo de cultura, a variedade e o estágio de desenvolvimento: as diferenças na resistência à transpiração, a altura da cultura, a rugosidade da cultura, a reflexão, a cobertura do

solo e o enraizamento da cultura, em diferentes tipos de cultura e em condições ambientais idênticas;

- Fatores tais como: salinidade do solo, baixa fertilidade da terra, aplicação limitada de fertilizantes, presença de horizontes duros ou impermeáveis, a falta de controle de doenças e de pragas e o manejo inadequado do solo podem limitar o desenvolvimento da cultura. Assim como a cobertura do solo, a densidade da planta e o teor de água no solo.

A partir de dados meteorológicos e da influência de parâmetros climáticos pode-se utilizar o método Penman-Monteith- FAO (PM-FAO) para cálculo da ET, sendo esse método recomendado internacionalmente para estimativa deste processo hidrológico (CARVALHO *et al.*, 2011). Atualmente, este é o único método padrão que estima a evapotranspiração de referência (ET₀), abrangendo variedades de locais e climas, podendo ser aplicado em cenários com poucos dados, através da equação 3.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (3)$$

Em que: R_n é a radiação líquida à superfície de cultura (em MJ.m⁻².d⁻¹); G é a densidade do fluxo de calor do solo (em MJ.m⁻².d⁻¹); T_a é a temperatura do ar média diária (em °C); u₂ é a velocidade do vento a 2 m de altura (em m.s⁻¹); e_s é a pressão do vapor de saturação (em kPa); e_a é a pressão do vapor atual (em kPa); Δ é a declividade da curva de pressão do vapor (em kPa.°C⁻¹) e; γ é a constante psicrométrica (em kPa.°C⁻¹).

Os valores de ET₀ estão relacionados a uma cultura de referência, normalmente grama verde com 12 cm de altura, resistência de superfície de 70 s.m⁻¹, em crescimento, albedo de 0,23 e sem limitação de água no solo. Porém, a ETR de uma cultura difere da ET₀, pois a cobertura do solo, as propriedades do dossel e a resistência da cultura são diferentes da grama (ALLEN *et al.*, 1998).

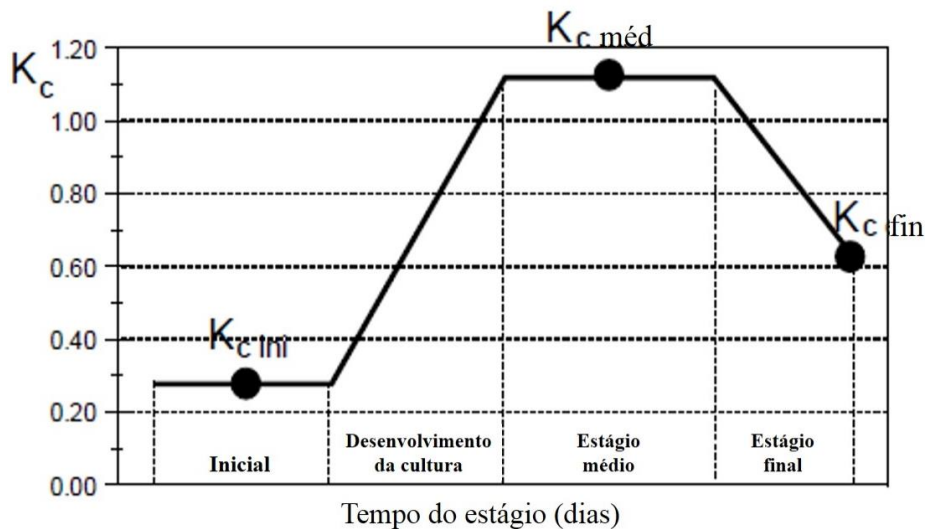
Com essa diferença, é possível relacionar a evapotranspiração de cultura (ET_c) com a ET₀, obtendo um coeficiente de cultura (K_c) estimado para diversas situações (KADLEC; WALLACE, 2009), demonstrado pela equação 4. Enquanto a ET₀ representa um índice de demanda climática considerando a grama como vegetação, o K_c varia de acordo com as

características específicas da cultura e apenas de forma limitada com o clima, possibilitando a estimativa de valores padrão entre locais e climas (FREITAS, 2018).

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (4)$$

Atualmente, diversas culturas possuem os valores de K_c estimados (ALLEN *et al.*, 1998). A determinação do K_c requer condições ideais de umidade no solo, extensas áreas de cultivo e sem doenças, ainda que ocorra produção total, mesmo perante as condições climáticas adversas. Devido à área foliar da cultura padrão ser constante e a da cultura real variar, o valor de K_c também irá variar e essa variação acontece de acordo com o período de desenvolvimento da cultura, o qual está dividido em quatro estágios: inicial, desenvolvimento da cultura, médio e final (ALLEN *et al.*, 1998). Na Figura 2 apresenta-se um exemplo de comportamento do K_c para cada um dos estágios de desenvolvimento de uma vegetação.

Figura 2 - Curva de desenvolvimento da cultura de uma vegetação



Fonte: Allen et al. (1998).

Em virtude da limitação de medições da radiação em muitos países, uma alternativa seria medir e corrigir a evaporação de uma superfície de água pelo Tanque Classe A (E_{tan}) para então, obter a ET (LIM *et al.*, 2013). De fato, de acordo com Allen *et al.* (1998), a Organização

Mundial Meteorológica (OMM) recomenda o TCA para estimar ET indiretamente, sendo a perda de água verificada por meio de um tanque raso de design específico (KADLEC; WALLACE, 2008). Devido à sua simplicidade, baixo custo e ampla variedade de aplicações (STANHILL, 2002), os TCA foram utilizados, em muitos locais por mais de meio século (BRUTSAERT, 1982). Há que se considerar, entretanto que embora muitos valores de coeficiente do tanque classe A (K_t) já tenham sido estipulados, em geral, é necessário encontrar um valor adequado, que represente a área de estudo (WARD; TRIMBLE, 2004), especialmente em função da disparidade entre regiões e climas (ANDA *et al.* 2018). A equação 5 mostra a relação entre a ET_c e a evaporação do TCA (E_{tan}), que resulta no coeficiente do tanque classe A (K_t).

$$ET_c = E_{tan} \cdot K_t \quad (5)$$

3.2 WETLANDS CONSTRUÍDOS

Em países desenvolvidos é comum a aplicação de tratamento para efluentes domésticos, industriais e agrícolas, sendo cada vez mais realizados investimentos em aprimoramento de tecnologias e/ou ampliação dos sistemas de tratamento. Porém, em países subdesenvolvidos, como o Brasil, ainda existe um grande déficit nesse aspecto, o que torna imperativo o emprego de técnicas de tratamento descentralizado de esgotos, adequadas à realidade das cidades brasileiras, para o atendimento da universalização do saneamento (SEZERINO *et al.*, 2015). De fato, na última década diferentes sistemas de tratamento descentralizados vêm sendo empregados, destacando-se os *wetlands* construídos (WC).

Os WC são sistemas tecnológicos projetados e construídos sob interação de plantas, solo/substrato e microrganismos para tratamento de águas residuárias, possibilitando simular e otimizar processos naturais que facilmente ocorrem em *wetlands* naturais, porém, de maneira que se consiga monitorar o sistema (BRIX, 1997; DOTRO *et al.*, 2017; VYMAZAL, 2010; VYMAZAL, 2005). Os sistemas são impermeabilizados, impedindo que o efluente percole para camadas profundas, dispostas abaixo da área construída e, desse modo, evitando que o efluente atinja as águas subterrâneas.

O uso de sistemas ecológicos tal como o WC, é reconhecido como uma tecnologia sustentável e uma solução com custo de implantação relativamente baixo (BIAŁOWIEC *et al.*, 2014), assim como de menor complexidade operacional e de baixo consumo energético. Sua

implantação pode ser ainda mais importante para aqueles locais que não são atendidos com rede geral de coleta de esgotos, como é o caso de condomínios, residências individuais (HOFFMANN *et al.*, 2013), outras economias e zonas rurais.

O sistema de WC é uma tecnologia de custo não muito elevado que está sendo utilizado para o tratamento de diferentes tipos de águas residuais, incluindo lodos (BIAŁOWIEC; JANCZUKOWICZ; RANDERSON, 2011), águas pluviais urbanas (SCHWAMMBERGER *et al.*, 2019; LEMOS, 2016; KADLEC; WALLACE, 2008) lixiviado de aterro sanitário (BIAŁOWIEC; WOJNOWSKA-BARYLA; HASSO-AGOPSOWICZ, 2007; MANNARINO *et al.*, 2006; MAZUCATO *et al.*, 2020), águas residuais suínas (BAPTESTINI *et al.*, 2017), bovinocultura de leite (PELLISSARI, 2013), efluente doméstico (BRASIL *et al.*, 2007; MAZUCATO *et al.*, 2020), efluente de vinícola (GALLINA *et al.*, 2012), efluente de curtume (CALHEIROS; RANGEL; CASTRO, 2007) e lodos de tanques sépticos (SUNTTI *et al.*, 2011).

A partir da utilização de diferentes tecnologias e em conjunto com sistemas convencionais, os WC podem ainda melhorar a qualidade das águas residuais (SALATI *et al.*, 2009). Alguns estudos constataram que esses sistemas, quando empregados como um tratamento secundário, recebem efluentes com menor carga de sólidos e atuam na remoção de poluentes (BRASIL; MATOS, 2008; DECEZARO, 2016; MAZUCATO *et al.*, 2020; SEZERINO *et al.*, 2015; SILVA, 2007; SUNTTI *et al.*, 2010), como nitrogênio e fósforo.

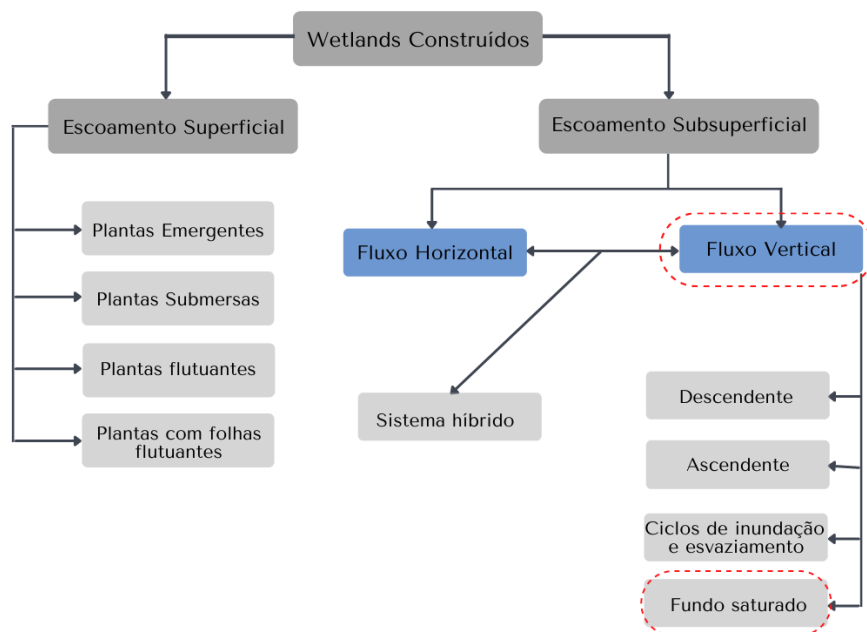
Existem várias configurações de WC, que diferem de acordo com as características necessárias de projeto, bem como com os processos necessários para remoção de poluentes (VYMAZAL, 2010). A Figura 3 aborda uma classificação proposta por Vymazal e Kropfelová (2008), no qual os WCs diferem-se em dois grupos principais: o escoamento superficial e o escoamento subsuperficial.

Os *wetlands* construídos subsuperficial horizontal (WCH) possuem condição de saturação do meio filtrante, no qual propicia, principalmente, em processos de degradação anaeróbia (DOTRO *et al.*, 2017), isto é, apresenta condições favoráveis para a ocorrência da desnitrificação (BRASIL, 2018), contanto que recebam o efluente parcialmente nitrificado. Além disso, são muito utilizados como pós-tratamento para melhorar a qualidade final do efluente (COSTA *et al.*, 2018).

Como pode ser observado na Figura 4, nos WCH o efluente flui lentamente da zona de entrada, através do material filtrante (meio suporte ou substrato, geralmente brita ou cascalho), até a zona de saída onde o nível de água é mantido abaixo da superfície, conhecido como controlador de nível (BRASIL, 2018; DOTRO *et al.*, 2017; VON SPERLING; SEZERINO,

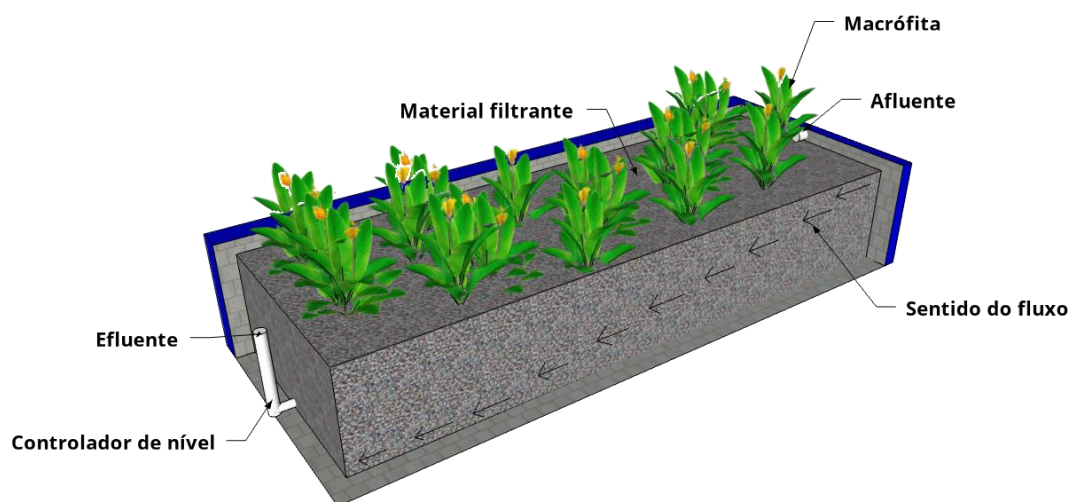
2018). O fluido escoo predominantemente de forma horizontal, ocupando os espaços vazios entre os grãos do meio filtrante (COSTA *et al.*, 2018; VON SPERLING; SEZERINO, 2018).

Figura 3 - Classificação dos *wetlands* construídos. Em destaque o tipo de WC utilizado neste estudo



Fonte: Adaptado de Vymazal e Kropfelová (2008).

Figura 4 - Corte esquemático de um WCH e seus componentes



Fonte: Autora.

Devido a importância do *wetland* vertical para o presente trabalho, no item seguinte (3.2.1) será apresentado este tipo de sistema com detalhamento, incluindo princípios básicos do tratamento.

3.2.1 *Wetland* construído de fluxo vertical descendente (WCVD)

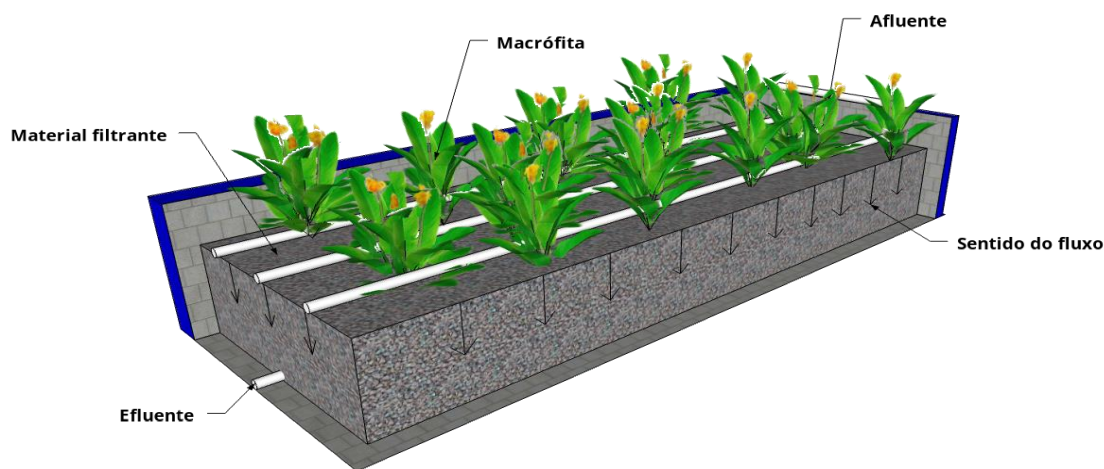
Os sistemas de *wetland* construído de fluxo vertical descendente (WCVD) estão inseridos no grupo dos WC de escoamentos subsuperficial. Segundo Kadlec e Wallace (2009), este sistema destaca-se em relação às demais configurações devido à possibilidade de transferência de elevados níveis de oxigênio à camada filtrante. Neste caso, as águas residuárias são aplicadas na superfície da camada filtrante e percolam através dessa camada, atravessando uma zona de raízes das macrófitas (BRIX, 1993) e permitindo a introdução de oxigênio (WU *et al.*, 2015), o que permite gerar ambientes aeróbios, nos quais é favorecida a nitrificação (VYMAZAL, 2010).

Neste sistema, a alimentação é realizada de forma intermitente na aplicação do esgoto, pulsos com poucos minutos de duração (DECEZARO, 2018; KADLEC; WALLACE, 2009); considerada a condição ideal para o crescimento controlado da biomassa no meio suporte e das raízes das plantas (SILVA, 2007), além de contribuir para evitar a colmatção do filtro (HOFFMANN *et al.*, 2011).

Como pode ser observado na Figura 5, as plantas presentes na camada filtrante dos WCVD são do tipo emergentes e alimentam-se do lançamento de efluente, tendo, cada aplicação (pulso), apenas alguns minutos de duração e com grandes intervalos de pausa. Normalmente, utiliza-se uma tubulação perfurada localizada acima ou abaixo da superfície da camada filtrante (areia ou brita), para assegurar uma distribuição uniforme sobre toda a área do leito (KADLEC; WALLACE, 2009). Assim, o volume de água residuária aplicada movimentase até atingir o fundo do sistema impermeabilizado, onde, depois de tratado, é drenado/coletado (KADLEC; WALLACE, 2009).

Essas condições de um WCVD, no tratamento secundário, aliadas a uma adequada taxa de aplicação hidráulica, também contribuem para uma boa eficiência de remoção de carga da demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos em suspensão (PELLISSARI *et al.*, 2015; SILVA, 2007; SUNTTI *et al.*, 2010), de demanda química de oxigênio (DQO) (SILVA, 2007) e de nitrogênio amoniacal (DECEZARO, 2016). Além disso, em geral, esses sistemas necessitam de uma área menor que os WCH (SILVA, 2007).

Figura 5 - Corte esquemático de um WCVD e seus componentes



Fonte: Autora.

Os materiais constantemente presentes no tratamento em sistemas de fluxo vertical são material filtrante/substrato, plantas e microrganismos (SEZERINO *et al.*, 2015). O material filtrante serve de suporte para o desenvolvimento das plantas e dos microrganismos, além de realizar a filtração do efluente e ser local de desenvolvimento das reações bioquímicas (DECEZARO, 2016; PELISSARI, 2013). São utilizados diversos materiais filtrantes e combinações com outros substratos de acordo com sua condutividade hidráulica e/ou capacidade de adsorção, tais como: areia (PELISSARI, 2013; SEZERINO, 2006), brita (BRASIL; MATOS, 2008; DECEZARO, 2016), solo poroso (SEZERINO; PHILIPPI, 1997; SILVA, 2007), brita e areia (MORAIS *et al.*, 2015), escória de alto-forno (MATOS *et al.*, 2015), dentre outros. A vantagem é que as macrófitas se adaptam em uma ampla variedade de substratos, desde solos até areias e britas, as quais, geralmente, ocupam uma parcela na superfície do material filtrante (VON SPERLING; SEZERINO, 2018). Assim, é de grande importância a escolha adequada do material filtrante que será utilizado no WC, pois nele ocorrem os processos físico-químicos e biológicos de degradação da matéria orgânica presente no efluente (DECEZARO, 2016).

As macrófitas são plantas que vivem tanto em ambientes úmidos quanto em ambientes saturados de água (PELISSARI, 2013), sendo que no sistema de tratamento com WC as mesmas possuem inúmeras funcionalidades, dentre elas: proporcionar condições adequadas para filtração (BRIX, 1994), para a transferência de oxigênio e para a percolação do efluente

(SEZERINO, 2006). Além disso, são capazes de remover e absorver poluentes e nutrientes, sendo responsáveis pela ciclagem destes (BIAŁOWIEC; ALBUQUERQUE, RANDERSON, 2014; SILVA, 2007). Parte dos nutrientes removidos, tais como nitrogênio e fósforo, são utilizados para suprir as demandas para seu desenvolvimento, sendo importante o corte regular das plantas para que os nutrientes não retornem ao sistema após sua morte e decomposição (DECEZARO, 2016). Deve-se considerar ainda, a adaptação das plantas às condições climáticas locais (SEZERINO, 2006).

Os microrganismos estão presentes em abundância no tratamento biológico em WCs. Dentre os vários que realizam a decomposição da matéria orgânica, estão: algas, fungos, protozoários e bactérias, sendo o grupo das bactérias, aeróbias e anaeróbias, o que desempenha o papel principal de remoção de poluentes e de reciclagem de nutrientes, além de resistir a variadas condições de pH, de temperatura, de salinidade e de pressão (NHAMBIRRE, 2016; SEZERINO, 2006; SILVA, 2007). Esses microrganismos estão presentes no material filtrante, na rizosfera e no efluente e formam o biofilme, sendo responsáveis pela remoção de matéria orgânica carbonácea, pelas transformações do nitrogênio (N), pela absorção de fósforo (P) e pela remoção de patógenos (PELLISSARI, 2013).

3.2.1.1 *Wetland construído vertical de fundo saturado (WCV – FS)*

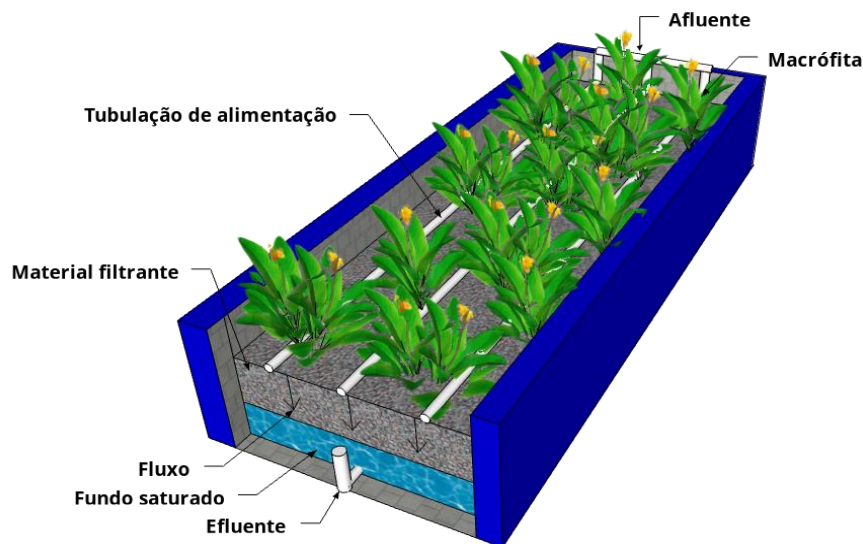
Os *wetlands* construídos verticais de fundo saturado (WCV-FS) fazem parte da configuração de WCs e seguem as mesmas características mencionadas no WCV-DL, com os mesmos pulsos intermitentes de esgoto a ser tratado para o aumento do arraste de oxigênio e percolação do efluente (BRASIL, 2018). A única diferença desse sistema está na presença de duas zonas distintas no material filtrante: a zona superior, que não está saturada, e a zona inferior, que está saturada (KIM *et al.*, 2014).

Para realizar a saturação no fundo é preciso elevar a saída da tubulação de drenagem (parte externa do WCV-FS). Essa tubulação é conhecida como controlador de nível (Figura 6). Mas, primeiramente, é necessário identificar a altura ideal de saturação a fim de obter melhor desempenho do sistema, isso porque, elevar adequadamente a posição de saída pode resultar em uma qualidade de efluente relativamente estável (Xu *et al.*, 2020).

As condições do fundo saturado permitem aumentar o tempo de contato entre as águas residuais e os microrganismos (MOLLE *et al.*, 2008) e são ideais para uma maior remoção de nitrogênio (N), sem acréscimo adicional de energia ou área (BRASIL, 2018). Já na zona superior ocorre nitrificação em razão das condições aeróbias (KIM *et al.*, 2014; SAEED e SUN,

2017), seguido da desnitrificação na camada saturada no fundo devido as condições anaeróbias/anóxicas, cumprindo os requisitos do processo biológico (BRASIL, 2018; FREITAS, 2015; SAEED; SUN, 2017; SILVEIRA *et al.*, 2015).

Figura 6 - Corte esquemático de um WCV-FS e seus componentes



Fonte: Autora.

Dessa forma, as características presentes podem resultar em diferenças na eficiência desses sistemas. Pelissari *et al.* (2018), por exemplo, encontrou o dobro de eficiência na remoção de nitrogênio para o WCV-FS em relação ao WCV (sem fundo saturado). Em um sistema piloto de WCV-PS em 10 cm, Mazucato *et al.* (2020) observaram uma remoção de nitrogênio total de 40% e de nitrogênio total de Kjeldahl (NTK) de 96%. Silveira *et al.* (2015) comparam a diferença de altura de saturação do fundo de dois sistemas piloto de *wetland* vertical, resultaram em uma remoção de carga de NTK de 45% e 58% para 0,15m e 0,25 m de saturação do fundo, respectivamente, em local com temperatura média diária de 26 °C no verão e 10 °C no inverno.

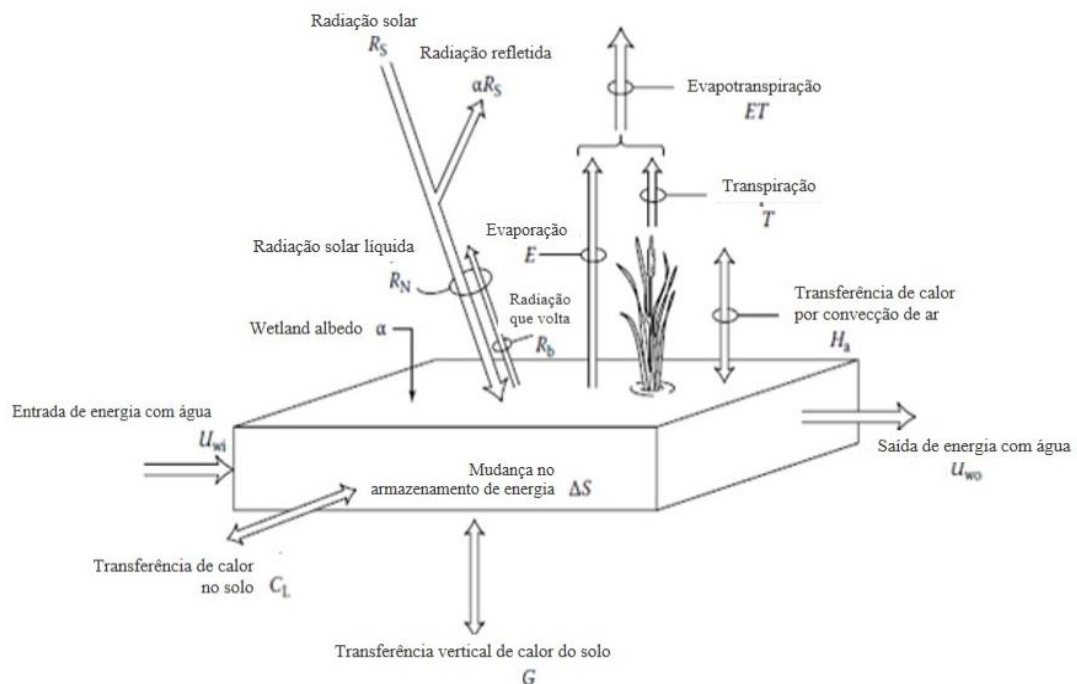
Além dos materiais atuantes no sistema e dos processos de nitrificação e desnitrificação que ocorrem, deve-se também considerar alguns fatores para assegurar o bom funcionamento do WCV-FS, dentre os quais, os fatores hidrológicos, que influenciam no tratamento e na perda de água no sistema.

3.2.2 Aspectos hidrológicos em *wetlands* construídos

Em sistemas de WCs, um tratamento bem-sucedido está associado ao projeto e à garantia da adequada profundidade e do bom escoamento da água. Para isso, é necessário compreender a dinâmica das águas no interior dos WC, de modo a entender a diminuição dos poluentes (DE PAOLI, 2015), pois, os processos hidrológicos desempenham um papel fundamental na determinação do tipo de condições bioquímicas e de biota presentes nestes sistemas (MITSCH; GOSELINK, 2007).

Alguns dos processos que atuam no funcionamento desses sistemas (Figura 7) incluem a precipitação e a evapotranspiração, bem como a interceptação, podendo ocasionar efeitos significativos na qualidade e na quantidade da água presente no WC (BORIN et al., 2011; HEADLEY et al., 2012).

Figura 7 - Componentes do balanço hídrico do WCFH



Fonte: Adaptado Kadlec e Knight (1996).

Os ganhos em sistemas naturais consistem na entrada de fluxo por meio de vazão, de escoamento, de precipitação e, em alguns casos, por descarga de água subterrânea (KADLEC,

WALLACE, 2009; KADLEC, KNIGHT, 1996; KADLEC, 1989; MITSCH, GOSSELINK, 2007). As perdas, por sua vez, consistem nas saídas de fluxo por água subterrânea e por evapotranspiração (KADLEC, 1989).

Nos WCs, os ganhos e perdas podem influenciar a eficiência da remoção de contaminantes, visto que a precipitação dilui a concentração de poluentes, aumenta a vazão (IWA, 2000), causa elevação temporária do nível da água e altera o comportamento hidráulico (BRASIL; MATOS, 2008), diminuindo o tempo de contato entre as substâncias transmitidas pela água e o meio desses sistemas (BORIN et al., 2011).

Ao contrário da precipitação, a ET reduz o volume de águas residuais, bem como a vazão, mas, por outro lado, aumenta a concentração de poluentes (VON SPERLING; SEZERINO, 2018) e o tempo de retenção, o que possibilita uma interação mais prolongada com o sistema (BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014; HEADLEY et al., 2012; KADLEC; WALLACE, 2009). Além disso, considera-se que, a ET pode ser bastante significativa em alguns períodos do ano (DE PAOLI, 2016).

3.2.2.1 *Interceptação em wetlands construídos*

Atualmente, há poucos estudos para entendimento da interceptação das plantas em relação à precipitação incidente, principalmente em sistemas de WCs. Entretanto, alguns trabalhos como de Araújo (2018), Decezaro (2016), Faccenda (2017) e Ramirez (2019) realizados no mesmo sistema avaliado nesse estudo, destacaram a possível interceptação vegetal do efluente que chega ao WCV-DL, observações realizadas em função da configuração da tubulação de alimentação elevada no sistema.

Decezaro (2016) observou que a parte aérea da *Heliconia psittacorum* interceptava uma parcela da água residuária aplicada, em razão da utilização de tubulação de alimentação elevada a 0,50 m do meio suporte. Esta condição de alimentação, contribui a cada pulso de efluente, para uma maior taxa de interceptação, uma vez que o intervalo entre os pulsos pode ser suficiente para a evaporação da água residual interceptada, renovando a capacidade de armazenamento de água da folha (FACCENDA, 2017). Além disso, a aparição de novas folhas nos perfilhos previamente podados podem interceptar parcelas da água, anteriormente não atingidas, possibilitando a ocorrência de maior evaporação (RAMIREZ, 2019).

Há que se considerar ainda que, enquanto a interceptação da água pelas folhas das plantas impede a remoção de poluentes, como fármacos, por outro lado, pelo processo de fotodegradação (ARAÚJO, 2018), o desenvolvimento das plantas acarreta o aumento do tempo

de retenção hidráulica (TDH) (DECEZARO *et al.*, 2018) e, conseqüente, o aumento da biodegradação de poluentes. É, portanto, de fundamental importância que sejam investigados, através de monitoramentos, a possível interceptação do efluente pela vegetação, bem como a interceptação da precipitação durante o desenvolvimento das plantas, de modo a avaliar a influência desses processos sobre o funcionamento desses sistemas.

Além disso, conforme o tipo de precipitação pode ocorrer também a variação no fluxo de água em um sistema horizontal, produzindo diferenças sazonais nos níveis de água (YAN *et al.*, 2020). Em sistemas verticais com fundo saturado, entretanto, pouco se tem conhecimento de possíveis interferências da precipitação no fluxo, bem como na eficiência do tratamento de poluentes.

3.2.2.2 *Evapotranspiração em wetlands construídos*

Os fluxos de energia que atuam em WCs, como ganhos e perdas, impulsionam as temperaturas da água no tratamento. Em condições de temperatura elevada, o maior ganho de energia é pela radiação solar e a maior perda de energia acontece pela ET (combinação de E e T) (KADLEC; WALLACE, 2009), uma vez que a bacia é isolada para evitar a infiltração de água no solo (PEDESCOLL *et al.*, 2013). Nesse caso, a perda de água para a atmosfera acontece por E (solo e/ou material filtrante e da água) e, ainda, por T (plantas) (KADLEC; WALLACE, 2009; VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008).

A ET é o primeiro mecanismo de perda de energia pelo WC e serve para dissipar a maior parte da energia, podendo, portanto, ser considerada como um processo de resfriamento para o sistema (KADLEC; WALLACE, 2009). Além disso, a ET, pode influenciar a eficiência de remoção de compostos orgânicos presentes no efluente (BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014). Białowiec, Zieliński e Dębowski (2006) indicam a diminuição no fluxo volumétrico no sistema de WC e, até mesmo, uma falta de efluente devido a ET.

De acordo com Sezerino (2021), a perda de água por evapotranspiração em sistemas de fluxo horizontal depende de alguns fatores, tais como: condições climáticas (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar); características da planta (espécie, estágio de desenvolvimento e densidade de plantio) e fatores ambientais.

A evapotranspiração é um componente muito importante do balanço hídrico e da ecologia dos ecossistemas dos WCs, algumas vezes, o volume de água perdido é motivo de preocupação, já que atinge seu máximo no começo da tarde e seu mínimo algumas horas após escurecer, resultando em uma diferença na vazão de entrada e na vazão de saída. Em alguns casos, a vazão

de saída pode cessar durante o dia em períodos de alta ET (KADLEC; WALLACE, 2009; VYMAZAL; KRÖPFELOVÁ, 2008).

Assim, para cada WC, a taxa de ET pode ser calculada de acordo com o balanço hídrico diário representado pela equação 2, relacionada a equação 6, mas contendo a entrada afluyente (Q_a) de águas residuais (HEADLEY *et al.* 2012).

$$ET_{WC} = Q_a + P - Q_e \quad (6)$$

Em que: Q_a é a vazão afluyente (em mm.d^{-1}); P é a precipitação (em mm.d^{-1}) e; Q_e é a vazão efluente (em mm.d^{-1}).

Atualmente, ainda existem poucos estudos de ET aplicados em WCV comparado ao WCH. Na Tabela 1 são apresentados os resultados de alguns estudos, que testaram diferentes configurações de WCs, variando o material filtrante, a cobertura vegetal e o regime de alimentação.

Estudos baseados em balanço hídrico mensal, como realizado por Headley et al. (2012), relataram que a perda de água por ET chegou a 27%, comparado com a vazão afluyente (Q_a) de sistema WCH transplantado com *Phragmites australis*. Já Carballeira, Ruiz e Soto (2016) encontraram 21,4% de perda, para a mesma espécie, quando utilizada a brita como material filtrante.

Com relação ao sistema vertical e aos termos volumétricos, os estudos de Pelissari (2013) e de Rouso (2017), realizados no sul do Brasil, resultaram em uma perda de água por ET equivalente a 6 mm.d^{-1} , equivalente a 6% de perda de água. Em estudo de Białowec, Albuquerque e Randerson (2014), monitorado na Polônia, durante 2 anos, a taxa de ET oscilou entre 0,98 e $4,61 \text{ mm.d}^{-1}$, com perdas de água acima de 90%.

Tabela 1 - ET para diversas configurações de WCs

Local	Escoamento	Fluxo	TAH (mm/d)	Nº de plantas (m ²)	Substrato	Macrófita	ET (mm.d ⁻¹)	Ano
Canadá	Subsuperficial	H	55	2,3	Areia + turfa preta	<i>Salix miyabeana SX67</i>	6,1 – 32,3	2019 ¹
SC - Brasil	Subsuperficial	h ^b	39,3	4,2 (V) 3,3 (H)	Areia + brita	<i>Typha dominigensis</i>	1,0 – 6,0	2017 ²
Polônia	Subsuperficial	V	1;3;5	7	Areia; Areia + Lodo	<i>Phragmites australis</i>	0,98 - 4,61	2014 ³
Portugal	Subsuperficial	H	116	-	Brita	<i>Phragmites australis</i>	4,3 – 37	2013 ⁴
Espanha	Superficial ^a	-	50	50	-	<i>Typha angustifolia</i>	0,0 – 52,80	2013 ⁵
Espanha	Superficial	-	50	50	Brita	<i>Typha angustifolia</i>	0,0 – 53,28	2013 ⁵
Espanha	Superficial	-	50	50	Brita	<i>Typha angustifolia</i>	0,0 – 49,46	2013 ⁵
Espanha	Superficial	-	50	-	Brita	-	0,85 – 20,7	2013 ⁵
Espanha	Superficial ^a	-	50	50	-	<i>Phragmites australis</i>	0,53 – 48,9	2013 ⁵
Espanha	Subsuperficial	H	100	50	Brita	<i>Phragmites australis</i>	0,53 – 52,32	2013 ⁵
Espanha	Subsuperficial	H	50	50	Brita	<i>Phragmites australis</i>	2,45 – 54,74	2013 ⁵
Espanha	Subsuperficial	H	50	-	Brita	-	0,82 – 7,14	2013 ⁵
RS - Brasil	Subsuperficial	V	105	2	Areia + brita	<i>Typha spp.</i>	6,0	2013 ⁶
Austrália	Subsuperficial	H	50 – 155	-	Brita	<i>Phragmites australis</i>	3,2 – 15,1	2012 ⁷
RS - Brasil	Subsuperficial	H	2 ^d	-	-	<i>Typha sp.</i>	5,4 – 14,7	2012 ⁸
Polônia	Subsuperficial	V	4,67	-	LE ^c + cascalho	-	1,25 – 1,93	2011 ⁹
Polônia	Subsuperficial	V	4,67	6 ^e	LE ^c + cascalho	<i>Juncus spp</i>	1,68 – 2,65	2011 ⁹
Itália - Norte	Subsuperficial	H	60	30	Brita	<i>Phragmites australis</i>	0,2 – 5,1	2011 ¹⁰
Itália - Sul	Subsuperficial	H	82 – 122	8	Brita	<i>Phragmites australis</i>	0,7 – 7,8	2011 ¹⁰

Notas: ^aMacrófita flutuante ; ^bSistema híbrido (WCVD seguido de WCH) ; ^cCinza do tratamento térmico de lodo de esgoto ; ^dm³ para 12 horas; ^epara área de 0,2m². ¹FRÉDETTE et al. (2019); ²ROUSSO (2017) ; ³BIAŁOWIEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON (2014); ⁴ALBUQUERQUE; RANDERSON; BIAŁOWIEC (2013); ⁵PEDESCOLL. et al. (2013); ⁶PELLISSARI (2013); ⁷HEADLEY et al. (2012); ⁸GALLINA et al. (2012); ⁹BIAŁOWIEC; JANCZUKOWICZ; RANDERSON (2011); ¹⁰BORIN et al. (2011); as informações ausentes sobre algumas variáveis são devido a informações não relatadas ou a valores que não se ajustaram aos níveis selecionados de uma variável.

Fonte: Autora.

A ET em WC varia sazonalmente, de valores mínimos no inverno a máximos no verão, dependendo do tamanho do sistema e do clima local, sendo que as taxas de pico no verão superam 5 mm.d^{-1} , e em climas temperados, no inverno, podem cair a 0 mm.d^{-1} (KADLEC; WALLACE, 2009). Contudo, essas taxas de ET podem variar de acordo com a saturação do meio filtrante, influenciados pelos vazios dos poros e pela retenção no meio filtrante (PELLISSARI, 2013). Uma vez que, a maioria dos estudos sobre ET em WCs são realizadas em escalas piloto e isoladas, a tendência das perdas de água é serem maiores comparado a culturas extensivas. Isto acontece, devido à transferência de calor e ao ar seco do ambiente externo, também conhecido como “efeito oásis” (BEEBE et al., 2014).

3.2.2.3 Efeito varal e efeito oásis

O efeito varal e o efeito oásis são dois fatores dependentes da localização do WC, que podem intervir nas taxas de evapotranspiração. O primeiro está relacionado ao transporte turbulento de calor sensível às partes aéreas das plantas, impulsionando a umidade para fora do sistema, quando o mesmo está em direção as correntes de vento (O’HOGAIN *et al.*, 2010). O efeito do varal resulta em plantas altas no interior do sistema, enquanto nas bordas uma vegetação menor, que por sua vez fornece uma transferência de energia horizontal devido ao vento (KIRKHAM, 2014).

Já o efeito oásis fornece uma transferência de energia vertical ao redor do WC, pois sua condição úmida e a transpiração o tornam mais frio do que o ar ambiente (KIRKHAM, 2014). O efeito oásis pode ser observado em locais de região seca e quente, característico de zonas urbanas (O’HOGAIN et al., 2010), sendo especialmente significativo em condições de vento e calor, embora a evapotranspiração da própria vegetação possa compensar qualquer redução no campo (ALLEN et al., 1998). Allen et al. (1998) aponta que a presença de vegetação próxima ao estudo, se comporta como quebra-vento, reduz a velocidade do vento e diminui a taxa de ET do campo diretamente além da barreira.

Nas análises de evapotranspiração em WCs é preciso ponderar que, a escala deve ser levada em consideração, pois pequenas áreas irão reagir intensamente ao microclima local, com taxas de ET precisas, com uma forte influência dos efeitos varal e oásis (BORIN et al., 2011; KADLEC; WALLACE, 2009; KADLEC, 1989). De fato, alguns estudos têm atribuído os elevados valores de ET em WC aos efeitos varal e oásis, contudo sem determinar, detalhadamente, esses efeitos, tendo em vista a complexidade do envolvimento dos aspectos

meteorológicos (BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014; BEBEE *et al.*, 2014; BORIN *et al.*, 2011).

3.2.2.4 *Influência da vegetação sobre os processos hidrológicos*

Dentro de um leito de WC, a influência das plantas não está apenas sobre o tratamento de poluentes, mas também sobre a água presente nesse sistema (BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014), uma vez que estas plantas interceptam uma parcela da água da chuva e ainda, transpiram para a atmosfera.

Na escolha da planta para utilização nos sistemas de tratamento deve-se considerar sua tolerância em relação a ambientes saturados de água e/ou esgoto, sua capacidade de crescimento e a possibilidade de ser encontrada nas proximidades onde o sistema será implantado, pois é importante que a planta seja adaptada às condições climáticas locais (ORMONDE, 2012). As macrófitas, por exemplo, são plantas que vivem tanto em ambientes úmidos quanto em ambientes saturados de água (PELLISSARI, 2013).

Diariamente é transpirado um grande volume de água no que se refere a trocas de água na planta e, para pequenos períodos, pode-se considerar o fluxo através da planta como um processo de regime permanente (TUCCI, 2001). No entanto, o estresse causado pela falta de água aumenta a resistência da planta, visto que a disponibilidade de água no solo limita a evapotranspiração da cultura. Em certa medida, a resistência estomática é, portanto, influenciada pela intensidade da radiação, temperatura e pelo déficit de pressão de vapor (ALLEN *et al.*, 1998).

As plantas aquáticas são mais produtivas do que as terrestres, devido à alta resistência às mudanças ambientais e à elevada eficiência da fotossíntese (TCHOBANOGLIOUS, 1987). Além disso, possuem um grande potencial de perda de água por transpiração, em razão da baixa eficiência de uso de água (BIAŁOWIEC; WOJNOWSKA-BARYLA, 2007; HEADLEY *et al.*, 2012). De fato, segundo Siuta (1996), a transpiração anual de plantas aquáticas (hidrófitas) encontram-se na faixa de 1000 a 1400 mm ao ano. O aumento de temperatura na primavera, ocasiona maiores perdas por ET nesta estação em relação ao inverno (PASSEPORT *et al.*, 2013) e por ET_o (BRASIL; MATOS, 2008).

De modo geral, a vegetação de WC é conhecida por apresentar elevadas perdas de água por ET na atmosfera (BORIN *et al.*, 2011; KADLEC; WALLACE, 2009), dependendo do estágio de crescimento das plantas (BORIN *et al.*, 2011; HEADLEY *et al.*, 2012). Neste aspecto, é importante destacar que a altura e as folhas da vegetação desempenham papel

fundamental, devido ao alto índice de área foliar (IAF) e à vegetação muito alta (PEDESCOLL *et al.*, 2013).

O IAF é uma quantidade adimensional da área foliar (parte superior) por unidade de área de solo abaixo dele, sendo expresso em m² de área foliar por m² de área terrestre, dependentes da densidade da planta e da variedade das culturas. Estes valores são muito diferentes conforme a cultura, sendo comum os valores entre 3-5 para culturas maduras (ALLEN *et al.*, 1998).

É importante estimar a área foliar (AF) da *Canna x generalis*, uma vez que as folhas são fundamentais na interceptação da chuva, basicamente ocasionam a diminuição do escoamento da precipitação juntamente com a água residual. Também é fundamental na avaliação do crescimento e desenvolvimento das plantas (PEIXOTO; CRUZ; PEIXOTO, 2011).

A medição da área foliar pode ser realizada de duas formas: de forma direta, pelo método destrutivo ou não, e de forma indireta, pelo método não destrutivo (SCHMILDT *et al.*, 2017).

Na forma direta pelo método destrutivo há necessidade da retirada de todas as folhas das plantas e demanda mão de obra elevada (TOEBE *et al.*, 2012). A remoção das folhas também compromete e dificulta o acompanhamento do desenvolvimento do ciclo da cultura no campo (MALAGI *et al.*, 2010). A forma direta pelo método não destrutivo, por sua vez, apesar de ser fácil e não requerer necessidade de remover as folhas da vegetação, necessita o uso de equipamentos onerosos (ILKAEE *et al.*, 2011).

A forma indireta pelo método não destrutivo possibilita realizar avaliações contínuas em uma mesma planta (TOEBE *et al.*, 2012), caracterizando-se pela relação entre fatores, como: a área foliar e as medições lineares (comprimento, largura) das folhas (MALAGI *et al.*, 2010). Esses fatores podem ser expressos por equação de regressão para estimativa da área foliar (MALAGI *et al.*, 2010).

Quando se realiza uma análise em termos de IAF, é importante o monitoramento da interceptação durante os estágios de desenvolvimento das plantas, bem como quantificar separadamente as parcelas responsáveis pela ET (FACCENDA, 2017), pois a área foliar verde muda ao longo da estação e normalmente atinge o máximo antes ou na floração (ALLEN *et al.*, 1998). De fato, plantas com IAF alto podem interceptar mais vento seco, aumentando a evapotranspiração (PEDESCOLL *et al.*, 2013) e a interceptação da água da chuva (YAN *et al.*, 2021).

A vegetação utilizada em WCs pode reter parte da precipitação, dependendo de suas características, do volume e da intensidade da chuva. Entretanto, não há estudos acerca do monitoramento da interceptação nestes sistemas. Em contrapartida, existem trabalhos que

investigaram a interceptação em vegetação florestal, e mesmo que, alguns deles indiquem certa dificuldade no monitoramento desse processo (WANG *et al.*, 2006; FAN *et al.*, 2014), em geral, confirmam a elevada capacidade de interceptação das chuvas (ZHANG *et al.*, 2021), sendo, portanto, também importante a investigação desses processos em *wetlands* construídos.

As macrófitas envolvem desde as plantas aquáticas vasculares até mesmo algas com tecidos visivelmente reconhecidos (BRIX, 1997). Diversas dessas espécies de plantas podem ser utilizadas em WC, tais como a taboa (*Typha angustifolia* L. ou *Typha latifolia*), junco (*Juncus spp* e *junco ingens*), caniço (*Phragmites spp*), jacinto d'água (*Eichhornia crassipes*), lentilha d'água (*Lemna*), *Cyperus papyrus*, *Canna x generalis*, *Canna spp.*, *Iris pseudacorus*, *Glyceria máxima*, *Arundo donax* e *Heliconia psittacorum* entre outras (RAMIREZ, 2019; ARAÚJO, 2018; DECEZARO, 2018; SEZERINO *et al.*, 2015; BIAŁOWEC; ALBUQUERQUE; RANDERSON, 2014; SILVA, 2007).

A *Canna spp.* é uma planta ornamental de origem tropical, capaz de permanecer em solos úmidos, como áreas úmidas ou margens de rios, permitindo que seja empregada em tratamento de águas residuais em WCs. A *Canna spp.* pode ser facilmente obtida e cultivada na maioria dos países do mundo, desde que receba, pelo menos, seis horas de luz solar por dia (BOONSANER; BORRIRUKWISITSAK; BOONSANER, 2011).

Um estudo de Aksorn e Visoottiviseth (2004), realizado no sul da Tailândia, durante 28 dias, em recipiente de vidro analisaram a exposição de cinco plantas emergentes em arsênio para selecionar a mais adequada para remover o arsênio e sua capacidade de transpiração. A transpiração foi obtida baseada no volume de água adicionado para elevar o volume do meio de teste ao nível do início do experimento, para compensar a água consumida pelas plantas. A *Canna spp.* obteve maiores volumes de consumo de água comparada a *Typha spp.*, chegando a valores até duas vezes superiores.

Monitoramentos realizados na Austrália, com as plantas *Phragmites australis*, *Juncus usitatus* e *Carex fascicularis*, mostraram uma perda média de água de 1100 mm ao ano (RAISIN; BARTLEY; CROOME, 1999). No Brasil, durante monitoramento de quatro diferentes sistemas de WCH com taboa (*Typha sp*), dois deles resultaram em maiores perdas de água (máxima de 14 mm ao dia), devido à presença de maiores quantidades de brotos da planta por volume do meio suporte e também, por receberem mais insolação diária (BRASIL; MATOS, 2008).

Alguns estudos recomendam o uso de outras plantas, que apresentam elevadas taxas de ET, para o tratamento de diferentes efluentes, tais como os salgueiros, o álamo e as gramíneas

(USEPA, 2000). O salgueiro, por exemplo, pode resultar em descarga zero de água (BIAŁOWIEC *et al.*, 2011; VYMAZAL; KROPFELLOVA, 2008).

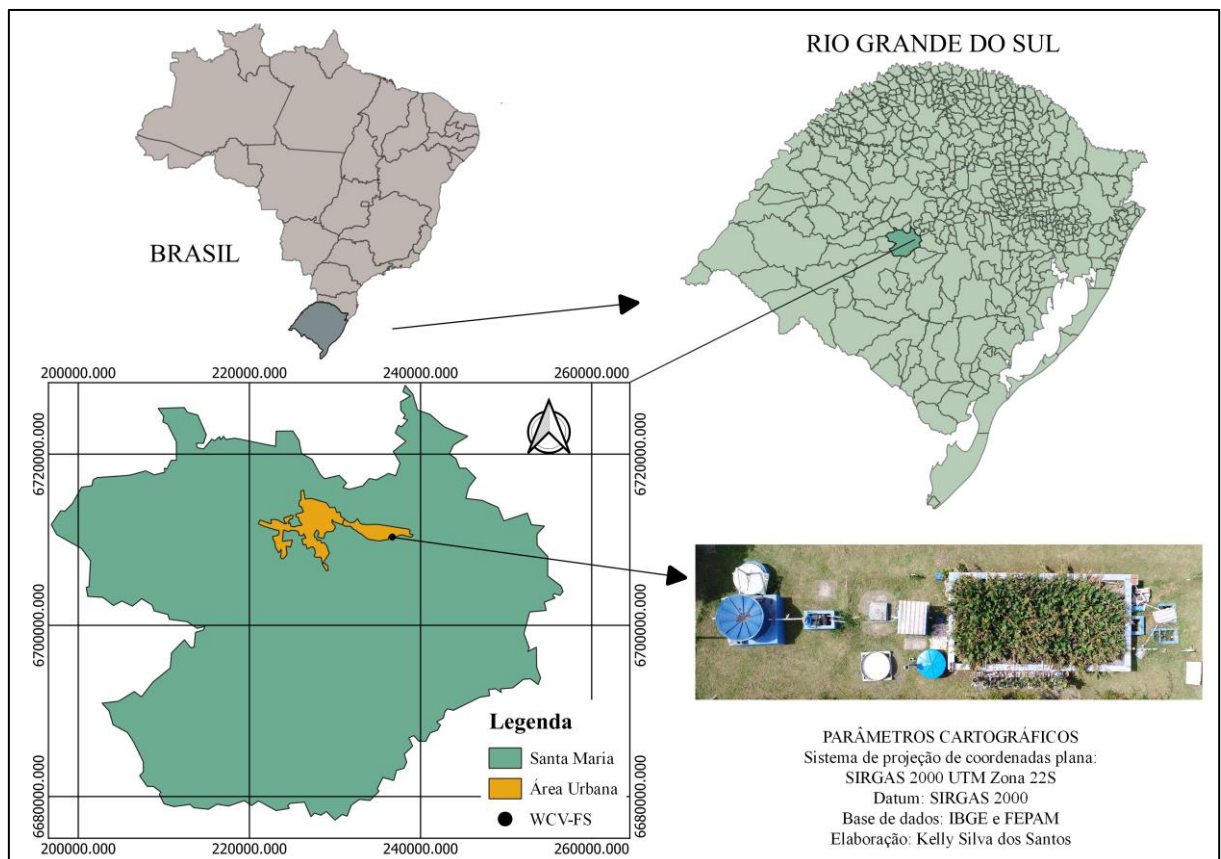
Além disso, há que se considerar ainda que, o aumento da concentração dos poluentes na água residual no leito do WC, em função da elevada taxa de ET, pode provocar efeitos tóxicos à vegetação (BRASIL; MATOS, 2008), muitas vezes superiores às necessidades da planta. Existem também, outros parâmetros de projeto que estão envolvidos na perda de água e no funcionamento do sistema como um todo, tal como o tipo de vazão (PEDESCOLL *et al.*, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL

Para este trabalho foram desenvolvidas atividades à campo, na estação de tratamento de esgoto (ETE) experimental, localizada no campus da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (29°43'04,2" S e 53°42'47,5" O) (Figura 8), no município de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil. A cidade de Santa Maria está posicionada em uma zona de transição entre o Planalto Meridional Brasileiro e a Depressão Central do Rio Grande do Sul (PEREIRA *et al.*, 1989), apresentando clima subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen e Geiger e o Plano Municipal de Saneamento Ambiental (2015).

Figura 8 - Localização da ETE experimental no Município de Santa Maria



Fonte: Autora.

A ETE experimental foi construída em escala real para realizar o tratamento de esgotos domésticos do prédio 35 da Casa do Estudante Universitário II (CEU II) da UFSM, como mostra a Figura 9. A ETE está em operação desde setembro de 2015, com sistema de tratamento primário seguido de tratamento secundário.

Figura 9 - Localização do ETE experimental na UFSM



Fonte: Autora.

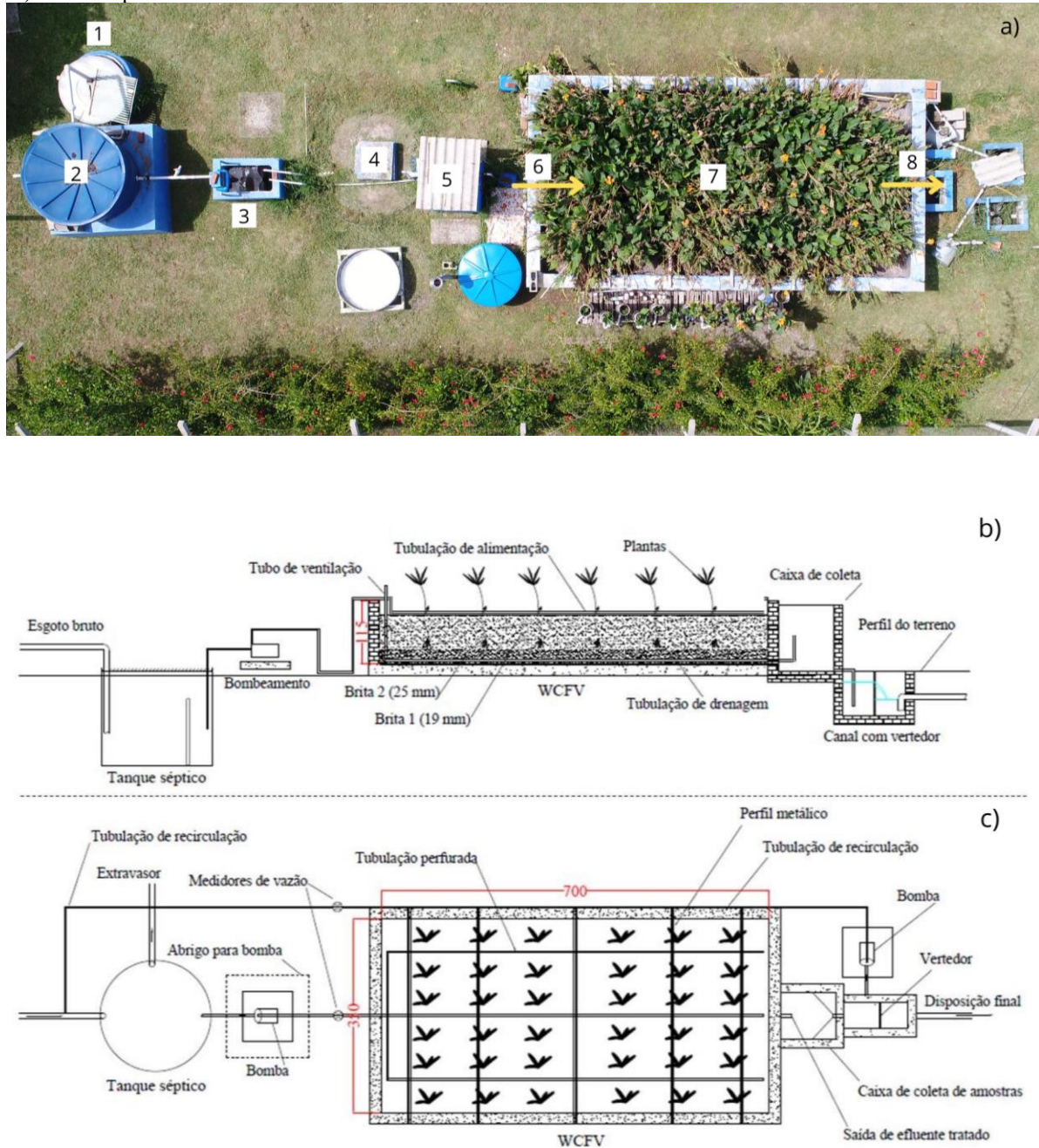
4.2 DESCRIÇÃO DA ETE EXPERIMENTAL

A ETE experimental foi implantada para realizar o tratamento de uma parcela do esgoto doméstico gerado, equivalente a 10 habitantes, com vazão de 1.500 L d^{-1} . A unidade é formada por tratamento primário e secundário, tanque séptico (TS) e *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS), respectivamente (Figura 10 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**).

As condições topográficas do terreno não permitem que a alimentação do sistema seja realizada por gravidade, assim foi necessário o emprego de uma bomba submersível, responsável por conduzir o esgoto bruto até o equalizador (Figura 10a). O equalizador possui capacidade de 2 m^3 , sendo utilizado para conduzir por gravidade o efluente até o TS. O efluente bruto escoar até um vertedor triangular e um medidor ultrassônico quantifica o volume antes de

chegar ao tratamento primário no tanque séptico. Neste tratamento prévio no TS, acontece a sedimentação de sólidos grosseiros em uma câmara única de concreto, de 4,71 m³ de capacidade. Em seguida, o efluente é bombeado até o WCV-FS.

Figura 10 - Detalhamento do projeto da ETE experimental. a) Vista superior em escala plena; b) corte longitudinal e c) vista em planta. Dimensões em cm

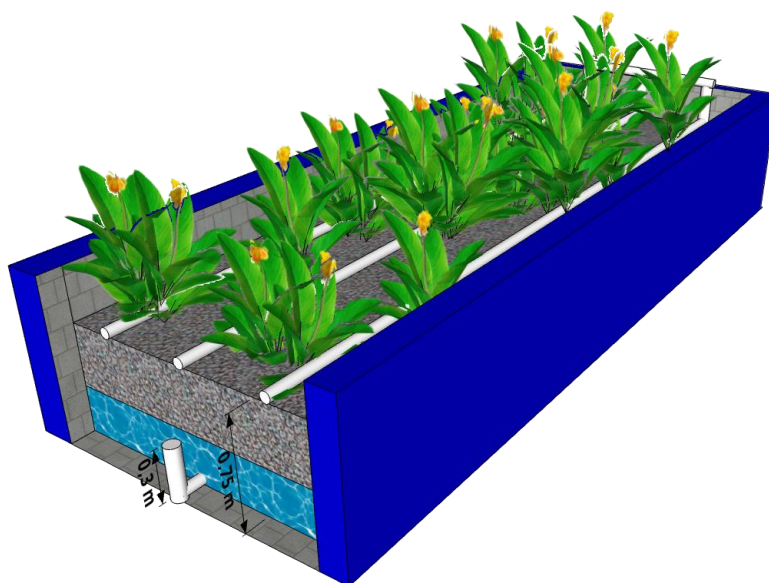


Nota: 1- bombeamento efluente bruto; 2- equalizador; 3- vertedor; 4- tanque séptico; 5- estação elevatória de bombeamento; 6- fluxo de entrada; 7- sistema de WCV-FS; 8- fluxo de saída.

Fonte: (a) Autora. (b)(c) adaptado de Decezaró (2018).

O WCV-FS apresenta uma área superficial (A_{sup}) de 24,5 m² (3,5 m de largura x 7,0 m de comprimento), com altura total da unidade de 1,15 m, sendo uma altura útil de 0,75 m (0,45 m de percolação e 0,30 m com fundo saturado) e uma borda livre de 0,40 m (Figura 11). O material filtrante escolhido para preenchimento do WCV-FS foi brita n° 1 (19,1 mm) e brita n° 2 (25 mm), devido a boa condutividade hidráulica, capaz de aumentar a vida útil do filtro. Assim, foram estruturadas 3 camadas, sendo a camada superior (0,05 m) e a camada de fundo (0,20 m) preenchidas com brita n°2 e a camada intermediária (0,50 m) com brita n° 1, com o objetivo de maior interação superficial para formação do biofilme.

Figura 11 - Detalhamento do *wetland* construído vertical de fundo saturado



Fonte: Autora.

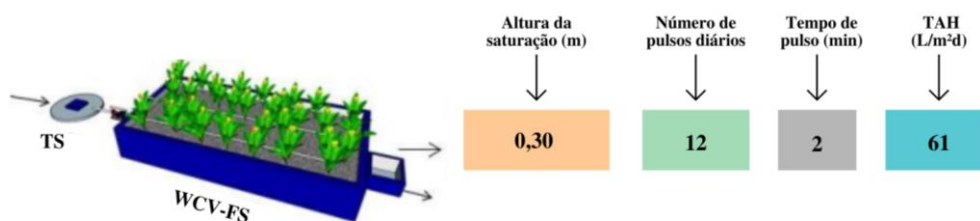
Neste material filtrante foram plantadas aproximadamente 2,3 mudas.m⁻² de *Canna x generalis*, uma planta ornamental, que possui um aspecto paisagístico e atrativo. Os perfilhos desta planta foram encontrados próximos da ETE, em Santa Maria, apresentando boa adaptação às condições climáticas do local e um desenvolvimento perene em todas as estações do ano (DECEZARO, 2018). O transplântio da vegetação foi realizado em 2016.

A alimentação do WCV-FS foi realizada por três linhas de tubos de PVC, localizadas sobre o material filtrante, de 32 mm de diâmetro e 6 m de comprimento. Assim, o efluente percola a zona sem saturação do meio filtrante até a zona saturada (0,3 m). O volume retido no fundo saturado é de 7,35 m³, considerando que a variação de armazenamento de água residual seja nula. Em seguida, atinge a tubulação de drenagem, composta por três linhas de tubos de PVC dispostas sob o material filtrante e, assentada sobre uma fina camada de brita n° 2, de 40 mm de diâmetro, a qual se encontra elevada a 0,3 m na parte externa do sistema. Além disso, em cada linha de drenagem está conectado um tubo de ventilação para uma maior transferência de oxigênio.

4.2.1 Condição operacional

A estação experimental operou durante todo o período de estudo, com uma vazão afluente de, aproximadamente, 1.500 L.d⁻¹ e uma TAH de 61 mm.d⁻¹. A alimentação no WCV-FS era intermitente, por bombeamento de 12 pulsos diários, com volume de 125 L por pulso de efluente do TS, distribuídos por três tubos de alimentação na superfície de 24,5 m² do WCV-FS, em um período de dois minutos (Figura 12). Todos os pulsos foram realizados pela ativação da bomba centrífuga com sucção no TS e controlados por um temporizador automático.

Figura 12 - Diagrama estrutural da condição operacional adotada para o WCV-FS



Fonte: Adaptado de Decezaró (2018).

O monitoramento foi dividido em dois ciclos: ciclo 1 (C1), com início em 05/10/20 e fim em 14/01/21, compreendendo um total 101 dias e; ciclo 2 (C2), com início em 15/01/21 e fim em 31/03/21, compreendendo um total de 75 dias. Ambas as etapas com 0,30 m de saturação

no WCV-FS. Esses dois períodos foram estabelecidos para monitoramento do tratamento ao longo de desenvolvimento da macrófita.

4.3 MONITORAMENTO QUANTITATIVO

O monitoramento da quantidade de efluente em cada etapa de tratamento foi realizado buscando-se averiguar o comportamento do sistema com relação à evapotranspiração e à interceptação, em diferentes condições climáticas e durante o desenvolvimento das plantas. Este monitoramento foi realizado todos os dias, durante 177 dias (out/20 a mar/21), no horário das 17 h e 30 min.

4.3.1 Vazão

A vazão de entrada e de saída do sistema WCV-FS foi monitorada diariamente (Figura 13). A medição da vazão afluyente ao WCV-FS foi realizada por um medidor eletromagnético (Incontrol, VMF), para condutos forçados. Já a vazão efluente ao WCV-FS foi monitorada por um sistema de sensor ultrassônico. O sensor ultrassônico instalado na saída contabilizou o nível da lâmina d'água a cada minuto.

Figura 13 - Medidores de vazão do WCV-FS. a) Medidor eletromagnético da vazão afluyente. b) Sensor ultrassônico medidor da vazão efluente



Nota: 1- sensor do medidor eletromagnético da vazão afluyente; 2- conversor do medidor eletromagnético da vazão afluyente; 3- sensor ultrassônico da vazão efluente no tanque armazenador; 4- armazenador de dados do sensor ultrassônico da vazão efluente.

Fonte: Autora.

A relação entre a área do tanque armazenador e o desnível em seu enchimento quando acionada a bomba, possibilitou estimar a vazão diária do efluente de saída. O medidor eletromagnético registrou a vazão instantânea e totalizada, mas não possui *Data Logger* conectado. Com isso, foi necessário fazer a leitura manual de vazão totalizada diariamente, às 17h30. Pela diferença diariamente contabilizada, foram obtidas as vazões diárias afluentes (Q_a) e efluentes (Q_e) ao WCV-FS.

4.3.2 Precipitação incidente (P)

Os dados de precipitação incidente foram obtidos por meio do monitoramento de um pluviômetro (*Ville de Paris*, modelo padrão da Agência Nacional das Águas), localizado na ETE experimental, instalado a uma altura de 1,5 metros e sem obstáculos no entorno (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**4). Com a utilização de uma proveta graduada específica em milímetros (mm), foi quantificada a precipitação incidente diária (P). A vegetação do entorno foi cortada regularmente e, além disso frequentemente era realizada a limpeza no pluviômetro para evitar qualquer acúmulo de folhas ou galhos em seu interior.

Figura 14 - Pluviômetro instalado na ETE experimental para monitoramento de precipitação incidente



Fonte: Autora.

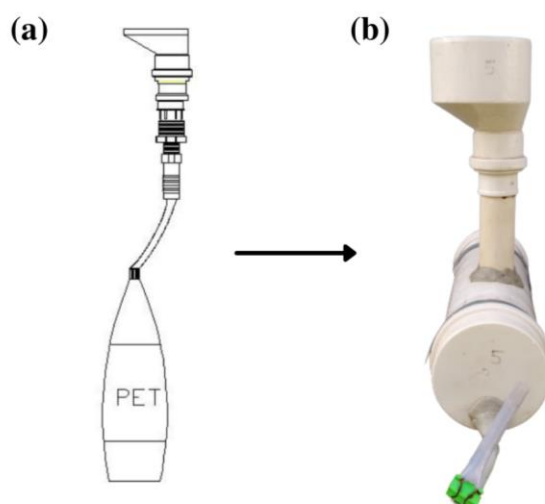
O monitoramento diário foi estabelecido às 17 h 30 min, em conformidade com a aferição dos demais dados diários do tanque classe A (Item 4.3.6) e dos medidores de vazão afluente e efluente ao WCV-FS (Item 4.5). Para fins de consistência, o volume de precipitação monitorado foi comparado com o volume de precipitação registrado de uma estação meteorológica (código 2953017 - ANA), localizada próxima ao local do experimento.

4.3.3 Precipitação interna (P_i)

A precipitação interna (P_i) foi determinada a partir de interceptômetros, instalados para quantificar a precipitação passante sob o dossel da vegetação, seguindo a metodologia de confecção proposta por Baumhardt *et al.* (2009).

A Figura 15a mostra o formato original proposto para o instrumento, utilizando uma garrafa de politereftalato de etileno (PET), que não se ajustou adequadamente quando inserido no interior das plantas do sistema. Assim, estes instrumentos foram modificados utilizando-se material de policloreto de vinila (PVC), de maneira a adequá-los às necessidades do WCV-FS (Figura 15b). Além disso, colocou-se uma base de madeira de, aproximadamente, 2,5 cm para a estabilidade dos interceptômetros sobre o material filtrante, bem como para facilitar a coleta de dados.

Figura 15 - Interceptômetros para monitoramento de precipitação interna. (a) Interceptômetro para coleta de P_i em florestas. (b) Interceptômetro para coleta de P_i na vegetação de WCV-FS



Fonte: (a) Baumhardt et al. (2009); (b) adaptado de Baumhardt et al. (2009).

O escoamento da chuva foi de uma redução de PVC (DN 100x50 mm), para uma tubulação de PVC (DN 50) até chegar em uma tubulação de PVC (DN 100) de armazenamento, a qual estava vedada e fixa em uma base de madeira. Por fim, o volume armazenado foi removido pela mangueira flexível fixada na tubulação de armazenamento, a qual manteve-se sempre vedada (Figura 16).

Essas peças conectadas resultaram em um interceptômetro de montagem rápida, de fácil manutenção e limpeza. Por fim, Baumhardt *et al.* (2009) indicam adicionar uma tela de PVC na parte superior do interceptômetro, a fim de evitar a interferência sobre o fluxo de água de quaisquer materiais depositados. Para esse estudo, no entanto, optou-se por não seguir essa recomendação devido a imediata quantificação do volume armazenado após poucos eventos de precipitação.

Figura 16 - Interceptômetros utilizados para monitoramento de Pi no WCV-FS. (a) Vista frontal; (b) Vista superior e; (c) Vista lateral



Fonte: Autora.

Foram dispostos oito interceptômetros na área superficial do WCV-FS (24,5 m²) para realização dos experimentos. Os instrumentos instalados (Figura 17), apresentavam diferentes alturas, variando de 21 cm a 49,5 cm de altura. Essas alturas foram estabelecidas devido à variação da altura das plantas durante seu desenvolvimento.

Figura 17 - Interceptômetros de diferentes alturas para monitoramento de P_i no WCV-FS



Fonte: Autora.

Para o monitoramento nessa pesquisa, utilizou-se a distribuição rotacional dos interceptômetros, alternando a posição de cada um ao longo da área superficial do WCV-FS, sobre o material filtrante, com o propósito de garantir maior representatividade das amostras monitoradas. Segundo Sari, Paiva e Paiva (2016), essa distribuição evita erros nos resultados, que poderiam ocorrer em razão da existência de pontos de caminhos preferenciais (gotejamento) ou pela concentração de áreas de maior intensidade foliar (áreas protegidas).

Para evitar os efeitos de borda no WCV-FS, as alocações dos instrumentos para as coletas foram concentradas na parte central do sistema (Figura 18), sendo adotada as distâncias das bordas ao introduzir os instrumentos de: na entrada e na saída de 50 cm, e nas laterais de 40 cm.

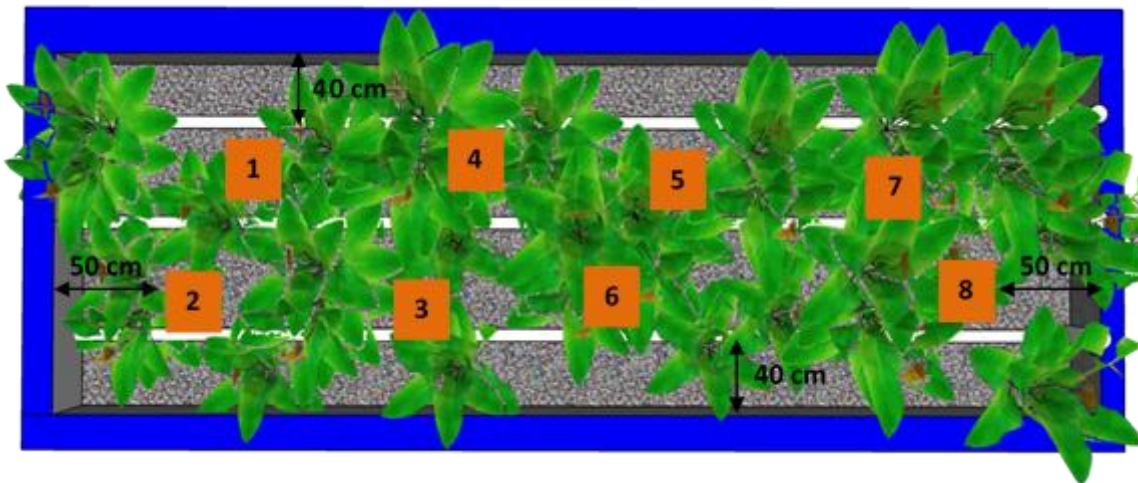
A capacidade de armazenamento nos interceptômetros era de, aproximadamente, três litros. A P_i foi quantificada por uma proveta graduada em mililitros (mL). Assim, cada volume coletado foi transformado em milímetros (mm) de chuva pela equação 7.

$$CC_{P_i} = \frac{X}{\pi \cdot (R_{pluv})^2} \quad (7)$$

Em que: CC_{P_i} é a chuva coletada (equivalente a lâmina de água, em mm de chuva) (em $L \cdot m^{-2}$);

X é o volume de água coletada (em L); R é o raio da boca de entrada do interceptômetro utilizado na coleta (em m).

Figura 18 - Distribuição espacial dos interceptômetros no WCV-FS



Fonte: Autora.

4.3.4 Escoamento pelo tronco (E_t)

O coletor de escoamento pelo tronco consistiu, basicamente, de um dispositivo coletor, um direcionador do fluxo e um recipiente de armazenamento. A metodologia adotada para elaboração destes dispositivos foi equivalente àquela utilizada por Giglio, Mota e Kobiyama (2017). Porém, como mostrado na Figura 19, foi necessário adaptar o material do coletor, devido à pequena espessura do tronco da *Canna x generalis*. O coletor instalado foi do tipo colar, no formato de funil de material flexível e vedado com fita (*Silver Tape*) em torno do tronco da planta. Essa etapa foi executada com cuidado, a fim de evitar a criação de depressões, obstáculos ao fluxo, pontos de infiltração ou vazamento de água.

A mangueira flexível (DN 3/16”), responsável por conduzir a água até o recipiente de armazenamento, ficou conectada entre o coletor de funil e o caule da planta, por um balão de látex (bexigas) e cola silicone. O balão possibilitou o desenvolvimento da planta devido a sua flexibilidade. Para armazenar o volume de chuva escoado pelo tronco foi utilizada uma garrafa

PET de 2 L, em sua tampa foi feito um orifício para encaixe da mangueira e fixada com massa adesiva epóxi.

Figura 19 - Dispositivos de coleta utilizados para monitoramento de Et. 1- Coletor de funil flexível; 2- Mangueira flexível; 3- Garrafa PET para armazenamento



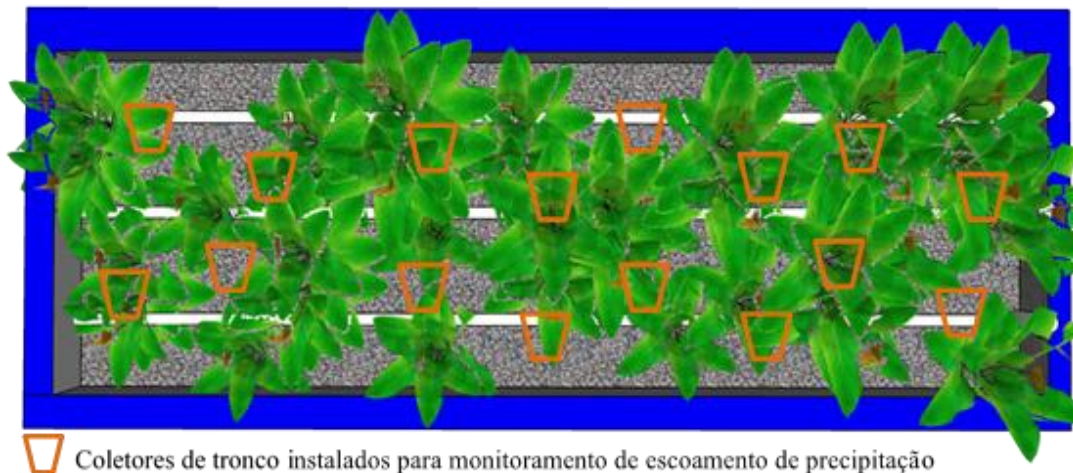
Fonte: Autora.

A determinação da área de contribuição para cada coletor foi dividida conforme os oito quadrantes do WCV-FS (Figura 20). Cada quadrante tem uma área equivalente a $3,0 \text{ m}^2$, tendo sido instalado em cada um dos quadrantes dois coletores, totalizando 16 coletores de escoamento pelo tronco, por evento monitorado. Em virtude das dificuldades operacionais para dispor as mangueiras nos coletores, a escolha das plantas ocorreu conforme o tamanho do caule, e considerando se essas já haviam sofrido corte, pois algumas plantas, no início de seu desenvolvimento, não possuem um caule apto para a instalação do dispositivo. A instalação do instrumento se deu a uma altura próxima a 30 cm da superfície do material filtrante.

Sari, Paiva e Paiva (2016) relatam que a enorme desvantagem desse sistema de coleta é que uma precipitação intensa, com E_t elevado, pode ocasionar extravasamento de uma parcela da água que está escoando, anulando a coleta. Em compensação, este método apresenta um

baixo custo, de fácil elaboração e manuseio, não apresentando grandes danos em razão do crescimento da planta, ou seja, as perdas devido aos defeitos do dispositivo, são relativamente pequenas.

Figura 20 - Distribuição espacial dos coletores de tronco no WCV-FS



Fonte: Autora.

Segundo Sari (2011), em geral, na contabilização da área de influência, considera-se a copa de uma árvore no formato circular e o raio sendo a média dos raios medidos nas quatro direções da copa, a começar do caule até o ponto onde se observava os últimos galhos. Porém, nesse estudo, essa metodologia foi adaptada para a vegetação do WCV-FS, pois as folhas desenvolvem-se de forma irregular no caule da planta, não apresentando uma copa definida. Logo, a área da copa foi calculada de acordo com a média da área foliar medida de 8 e 16 perfis e o número de folhas, como apresentado na equação 8.

$$A_c = C * L * NF \quad (8)$$

Em que: A_c é a área foliar da *Canna x generalis* onde o dispositivo foi instalado (em m^2); C é o comprimento de cada folha (cm); L é a largura de cada folha (m); NF é o número de folhas de cada planta.

As águas armazenadas, oriundas de cada um dos troncos monitorados, foram quantificadas por uma proveta graduada em mililitros (mL) e o valor total coletado em cada tronco foi determinado pela equação 9, proposta por Sari, Paiva e Paiva (2016).

$$E_t = \frac{Y}{\pi \cdot (R_c)^2} \quad (9)$$

Em que: E_t é a parcela que escoou pelo tronco (em $L \cdot m^{-2}$ – mm de chuva); Y é o volume de água coletada (em L); R_c é o raio da copa da *Canna x generalis* onde o dispositivo foi instalado (em m^2).

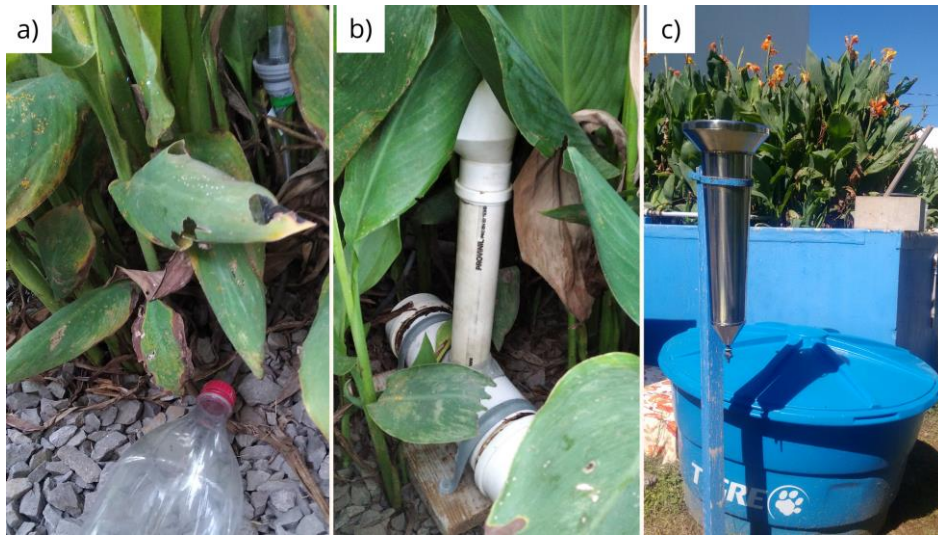
Inicialmente foram instalados 8 coletores de tronco monitorados no ciclo 1 (C1) e em seguida instalou-se 16 coletores de tronco monitorados no ciclo 2 (C2). O C1 e o C2 foram descritos no item 4.4. As 8 macrófitas no C1 e 16 macrófitas no C2 foram selecionadas para uma área de 24,5 m^2 do WCV-FS, desconsiderando-se na escolha àquelas plantas de menor diâmetro, considerou-se assegurada a uniformidade da vegetação do WCV-FS, uma vez que os diâmetros, as estruturas foliares e as ramificações são semelhantes e, assim, espera-se menores variações no percentual de E_t . O monitoramento de E_t foi realizado, visto que o trabalho realizado em florestas, como de Germer, Werther e Elsenbeer (2010), relatam a importância do monitoramento de E_t de uma ampla faixa de diâmetros dos caules de diferentes espécies ali presentes.

A estimativa de E_t para um dado evento foi determinada como sendo a média dos 16 valores determinados pela equação 9. Na impossibilidade de monitoramento de todos os coletores de tronco em uma dada coleta, em virtude da ocorrência de problemas operacionais, a estimativa de E_t foi realizada com base no número máximo de coletores considerados adequados para cada coleta em análise.

4.3.5 Interceptação (I)

Para estimar a interceptação da chuva na área do WCV-FS (24,5 m^2) foram realizadas coletas da precipitação incidente (P), da precipitação interna (P_i), que atravessou a vegetação, e do volume de precipitação que escoou pelo tronco (E_t) (Figura 21), sendo a interceptação calculada conforme a equação 1 (item 3.1.1).

Figura 21 - Equipamentos instalados para realização das coletas de água da chuva. a) Coletor da água que escoa pelo tronco; b) Interceptômetro; c) Pluviômetro



Fonte: Autora.

A previsão do tempo foi verificada com antecedência para que os eventos de precipitação fossem monitorados, no intervalo entre 24 horas e 48 horas.

4.3.6 Evapotranspiração (ET)

4.3.6.1 Evapotranspiração da cultura *Canna x generalis* do WCV-FS

A partir da quantificação da interceptação da chuva (I) retida nas folhas da vegetação, e da vazão de entrada e de saída do WCV-FS, foi possível calcular os volumes diários de evapotranspiração de cultura (ET_c) da *Canna x generalis*, por meio de balanço hídrico do volume que entra e sai do sistema (Figura 22).

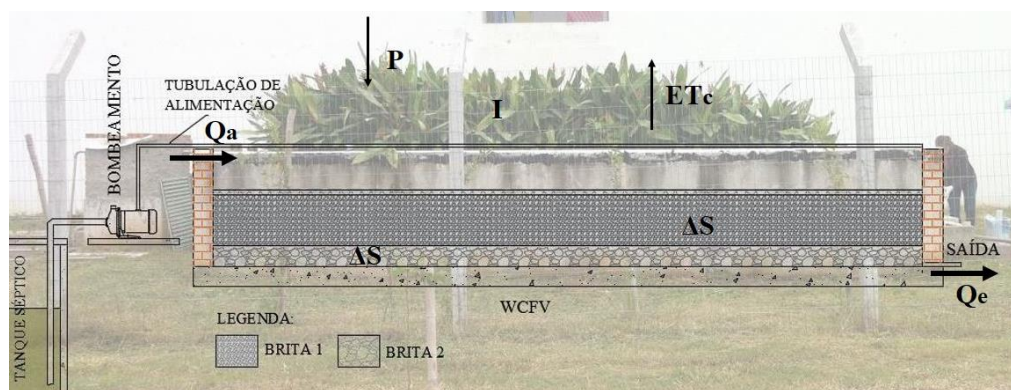
A determinação da vazão diária de evapotranspiração da cultura (ET_c) da *Canna x generalis*, em termos de taxa de aplicação superficial (TAS), foi calculada pela Equação 10. Conforme os valores diários de ET_c da *Canna x generalis*, foi determinado um valor médio mensal de ET_c e comparado entre os dois ciclos de desenvolvimento da macrófita.

$$ET_c = \frac{Q_a + P \cdot A_{sup} - I - \Delta S - Q_e}{A_{sup}} \quad (10)$$

Em que: ET_c é o volume diário de evapotranspiração de cultura (em mm d^{-1}); Q_a é a vazão afluyente (em L d^{-1}); P é a precipitação incidente (em mm); A_{sup} é a área superficial do WCV-FS (em m^2); I é a precipitação interceptada (em mm); ΔS é a variação de armazenamento de água no sistema (em L); Q_e é a vazão efluente (em mm d^{-1}).

Considerando a precipitação incidente (P) diária sobre a área superficial (A_{sup}) do WCV-FS, a variação de armazenamento de água no sistema (ΔS) a longo prazo foi considerada desprezível ($\Delta S = 0$), pois varia com a mesma intensidade durante todo o período do fluxo. Estabelecida a ET_c , é possível determinar o coeficiente do TCA (K_t), através da equação 5.

Figura 22 - Variáveis responsáveis pelo balanço hídrico para monitoramento de ET_c .



Fonte: Adaptado de Faccenda (2017).

4.3.6.2 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência foi estimada a partir de dados meteorológicos, obtidos do site oficial do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), da estação automática de Santa Maria – A803 (código OMM: 83936). Utilizando informações de temperaturas máxima e mínima do ar e de velocidade do vento, em formato horário e diário, de outubro/20 até março/21. Os dados entre os dias 05/10/2020 e 10/11/2020 foram utilizados em formato diário, devido a falhas nos dados horários neste período. Assim, a partir do dia 11/11/2020 até dia 31/03/2021 foram utilizados dados horários. O horário inicial foi considerado o mesmo em que foi realizado o monitoramento da ETE experimental (17 h 30 min), sendo que os dados meteorológicos fornecidos pelo INMET são apresentados em GMT (Greenwich Mean Time), portanto, três horas adiantados.

O fluxo de calor do solo (G) da equação de 3 (item 3.1.2) é considerado zero, em função do fundo impermeável do WCV-FS. Considerou-se a altitude do local de 103,1 metros (INMET) para o cálculo da pressão atmosférica, resultando em 100,08 kPa e, conseqüentemente, uma constante psicométrica (γ) igual a 0,066.

Devido às falhas no monitoramento da radiação solar, esta variável foi calculada seguindo uma equação simples recomendada por Hargreaves e Samani (1982). De acordo com Bezerra (2010), os valores de radiação solar (R_s) são utilizados apenas quando positivos, ou seja, quando houver entradas de radiação na atmosfera, sendo convertidos de Kilojoule (kJ) para Megajoule (MJ). A radiação líquida (R_n) foi obtida em função de informações de altitude do local (103,1 metros para o campus da UFSM - INMET), da latitude do local (29°43'03.3" S) e da radiação solar (ALLEN et al., 1998). O Quadro 1 apresenta as equações para estimar R_s , u_2 , e_s , e_a , Δ , P_{atm} e γ e, conseqüente, aplicação da equação 3 (item 3.1.2) para obter ET_0 . A relação entre a ET_c da *Canna x generalis* e a ET_0 estimada resultou em valores de Kc referentes ao coeficiente de cultura (equação 4, item 3.1.2).

Quadro 1 - Equações utilizadas nos cálculos para obtenção da evapotranspiração de referência (ET_0)

Termos	Equações
Velocidade do vento a 2 m (u_2)	$u_2 = u_{10} \frac{4,87}{\ln\left(\frac{67,8z_w - 5,42}{z_w}\right)}$
Pressão de vapor atual (e_a)	$e_a = 0,61 \exp\left(\frac{17,27 T_n}{T_n + 237,3}\right)$
Pressão de vapor de saturação (e_s)	$e_s = \frac{\left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_x}{T_x + 237,3}\right)\right] + \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_n}{T_n + 237,3}\right)\right]}{2}$
Declividade da curva de pressão de vapor (Δ)	$\Delta = \frac{4099 \left[0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T_a}{T_a + 237,3}\right)\right]}{(T_a + 237,3)^2}$
Pressão atmosférica (P_{atm})	$P_{atm} = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293}\right)^{5,26}$
Constante psicométrica (γ)	$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P_{atm}$
Radiação solar (R_s)	$R_s = K_{R_s} R_a \sqrt{T_x - T_n}$

Notas: u_2 é a velocidade do vento a 10 m (em $m s^{-1}$); z_w é a altura da medida original (10 m) (em m); T_x é a temperatura máxima diária (em °C); T_n é a temperatura mínima diária (em °C); T_a é a temperatura média diária do ar (em °C); K_{R_s} é o coeficiente empírico para região continental (0,16); R_a é a radiação solar no topo da atmosfera (em $MJ.m^{-2} d^{-1}$).

Fonte: Autora.

4.3.6.3 Evaporação de Tanque classe A (TCA)

Com a finalidade de quantificar a evaporação, instalou-se um tanque classe A (TCA) nas proximidades do sistema, seguindo as recomendações de Allen et al. (1998) e Tucci (2001). O tanque foi nivelado sob um suporte de madeira, aproximadamente 15 cm acima do nível do solo (Figura 23).

Figura 23 - Tanque classe A instalado próximo ao WCV-FS



Fonte: Autora.

Para verificação do nível de água, foram distribuídas réguas graduadas na borda do interior do tanque, garantindo um desnível menor que 0,5 cm, conforme recomendado por Allen et al. (1998). Desta forma, verificou-se o seu nível, diariamente às 17h30, de forma a garantir que o nível do tanque permaneça entre 5 e 7,5 cm da borda, condizente ao sugerido por Allen et al. (1998) e Tucci (2001), ou seja, realizando o complemento manualmente de água, quando necessário, e registrando as correções. Foram realizadas limpezas regularmente, a cada 7 dias, com o propósito de evitar a turbidez da água. Os valores de E_{tan} foram determinados pela diferença diária do nível da água e considerando a precipitação, conforme demonstrado na

Equação 11. Os valores obtidos de evaporação diária do TCA (E_{tan}) foram utilizados para estimar o coeficiente K_t , conforme apresentado anteriormente pela Equação 5 (item 3.1.2).

$$E_{tan} = P - 10 (n - n_{-1}) \quad (11)$$

Em que: n é a distância da borda ao nível da água no dia (em cm); n_{-1} é a distância da borda ao nível da água no dia anterior (corrigido) (em cm) em; P é a precipitação do pluviômetro (mm).

4.4 MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO

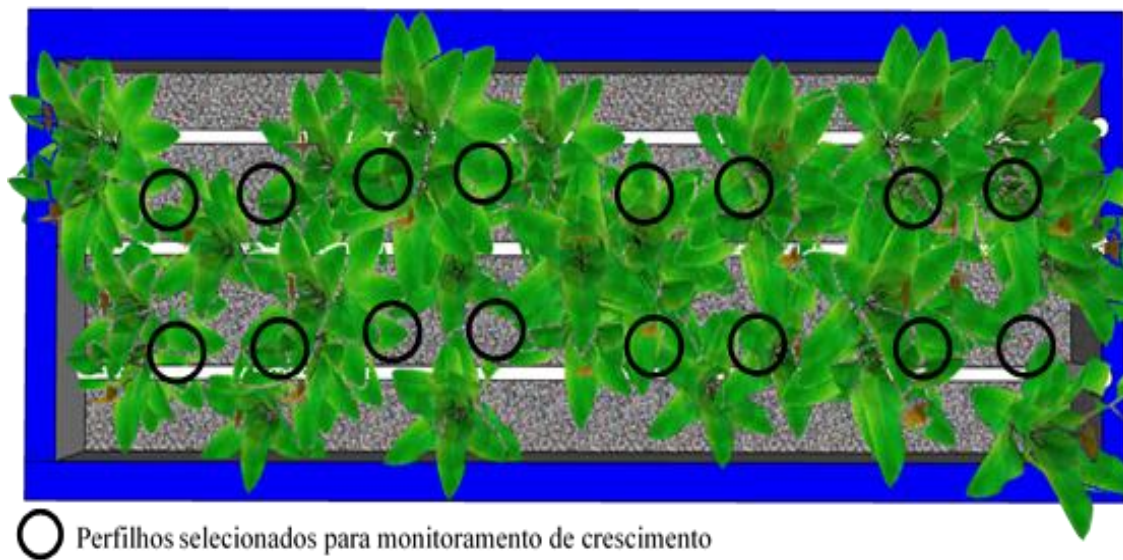
A vegetação do WCV-FS foi monitorada em termos de número de perfilhos, de crescimento (altura), além da largura (cm) e do comprimento (cm) das folhas. A quantificação do número de perfilhos foi realizada após cada corte da vegetação. Foram monitorados dois ciclos de desenvolvimento da macrófita de tempo diferentes: ciclo 1 (C1), de 05/10/20 até 14/01/21, compreendendo um total de 101 dias; ciclo 2 (C2) de 15/01/21 até 31/03/21, finalizando com um total de 75 dias.

Seguindo as recomendações de Ramírez (2017), o corte das plantas foi realizado, aproximadamente, a cada 3 meses, considerado o tempo para o máximo de desenvolvimento das plantas, sendo o início e o fim de cada ciclo determinado pelo corte das macrófitas. Realizou-se um corte de, aproximadamente, 45° nos perfilhos da *Canna x generalis*, a uma distância de 30 cm acima da superfície do material filtrante.

No C1 e C2 mediu-se a altura das plantas, a largura e comprimento das folhas de forma quinzenal. Para a medição foram selecionados aleatoriamente 16 perfilhos da *Canna x generalis*, localizados no interior e próximos a borda do WCV-FS (Figura 24). A altura foi verificada com o auxílio de uma fita métrica, medindo a distância entre o colo da macrófita até o final da última folha completamente expandida.

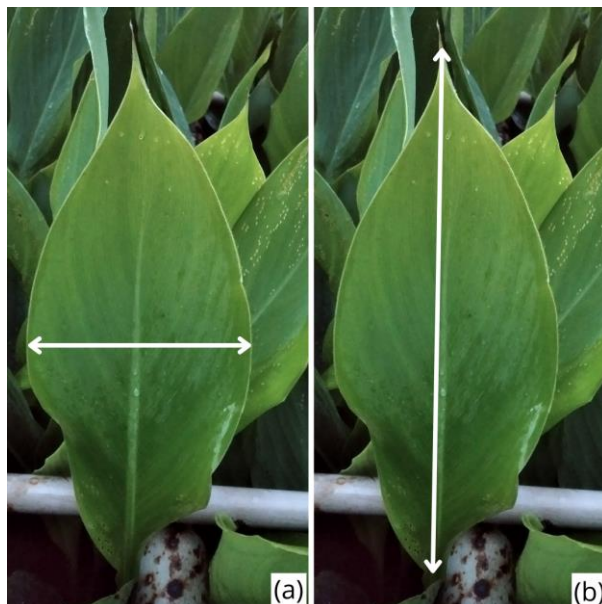
Para estimar a área foliar (AF) da *Canna x generalis* utilizou-se o método indireto e não destrutivo em campo, sendo as folhas submetidas a medidas de comprimento (C) e de largura (L), avaliadas individualmente, utilizando uma fita métrica em milímetros (Figura 25). O comprimento foi medido ao longo da nervura central, representando a distância compreendida entre a base da folha no ponto de inserção do pecíolo até o seu ápice, e a largura foi considerada na parte mediana da folha, seguindo as recomendações de Zucoloto, Lima e Coelho (2008).

Figura 24 - Esquema do monitoramento de crescimento da *Canna x generalis* no WCV-FS



Fonte: Autora.

Figura 25 - Monitoramento do desenvolvimento da vegetação. a) medição da largura das folhas (em cm); b) medição do comprimento das folhas (em cm)



Fonte: Autora.

Conforme apresentado por Ramirez (2019), os parâmetros de monitoramento da vegetação podem ser calculados de acordo com as equações 12 e 13:

$$TC = \frac{A_p}{T} \quad (12)$$

Em que: TC é a taxa de crescimento da planta; A_p é a altura do perfilho (em cm); T é o tempo em semanas.

$$N_p = \frac{T_p}{A_{wc}} \quad (13)$$

Em que: N_p é o número de perfilhos (em perfilho m^{-2}); T_p é o total de perfilhos contabilizados no WCV-FS; A_{wc} é a área do WCV-FS (em m^2).

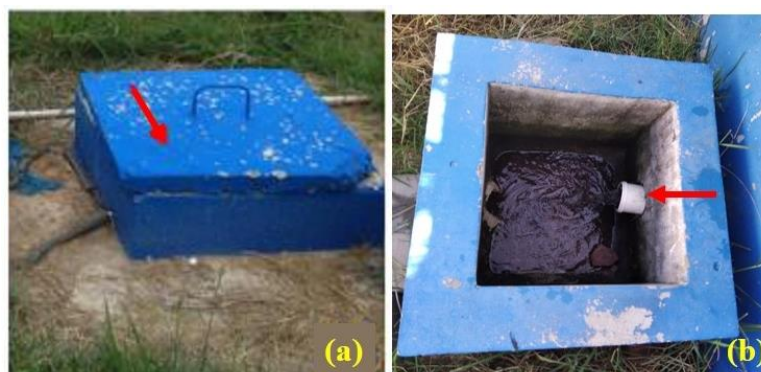
Para estimar o índice de área foliar (IAF) da *Canna x generalis* no WCV-FS utilizou-se os valores da área foliar (A_c) (equação 8) do Item 4.3.4 e a quantidade de perfilhos (N_p) em relação a área superficial do sistema ($A_{sup} = 24,5 m^2$), conforme a equação 14. A quantidade de perfilhos foi contabilizada no início de cada ciclo, após a realização do corte.

$$IAF = \frac{A_c}{A_{sup}} N_p \quad (14)$$

4.5 MONITORAMENTO QUALITATIVO

O monitoramento qualitativo da ETE experimental aconteceu por meio da realização de coletas e análises físico-químicas na unidade do TS e do WCV-FS, em dias com precipitação e dias secos de temperatura elevada, conforme as previsões meteorológicas. As coletas foram feitas em dois pontos da ETE experimental, na saída do TS (Figuras 26a) e na saída do WCV-FS (Figura 26b). As três primeiras coletas da amostragem foram realizadas no intervalo de 20 minutos durante um período de duas horas, sem monitoramento da vazão de saída. Em seguida verificou-se a necessidade de coletas em menores intervalos de tempo para monitoramento da vazão e da Demanda Química de Oxigênio (DQO), durante um mesmo período de duas horas.

Figura 26 - Locais de amostragem. a) Ponto 1 – efluente tanque séptico; b) Ponto 2 – efluente WCV-FS



Fonte: Autora.

Em dias com precipitação realizou-se as coletas no WCV-FS após o fim do evento e após dois dias era realizada nova coleta no mesmo horário, com a finalidade de relacionar o volume precipitado e a perda de água por evapotranspiração com a eficiência de remoção. Cada coleta continha 14 amostras na saída do WCV-FS, e uma amostra na saída do TS. As amostras coletadas foram armazenadas em garrafas de vidro, conservadas em um recipiente com isolamento térmico, com temperatura em torno de 5°C, e imediatamente encaminhadas ao laboratório para realização das análises ou então, armazenadas no refrigerador para realização das análises no dia seguinte.

A eficiência do tratamento do efluente foi determinada e avaliada para o WCV-FS, por meio de coletas e análise do parâmetro demanda química de oxigênio total (DQO_t). As análises foram realizadas com base no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) no Laboratório de Engenharia de Meio Ambiente (LEMA), na UFSM.

4.5.1 Eficiência do tratamento

Geralmente, a eficiência de sistemas de tratamento de esgoto do tipo WC é apresentada na forma de concentração de poluentes. Kadlec e Wallace (2009) indicam a determinação da eficiência em termos de concentração de poluentes, conforme a equação 15.

$$E_c = \left(\frac{C_a - C_e}{C_a} \right) 100 \quad (15)$$

Em que: E_c é a eficiência de remoção em concentração de poluentes (em %); C_a é a concentração de poluentes afluente ao sistema (em g.m^{-3}); C_e é a concentração de poluentes efluente ao sistema (em g.m^{-3}).

4.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O parâmetro DQO_t , e os dados de evapotranspiração, de evaporação e de interceptação foram analisados estatisticamente, por meio de estatística descritiva em termos de média, mediana, soma, desvio padrão, mínimos, máximos e percentuais, em escala diária e mensal. Além disso, para melhor visualização das variações, utilizou-se métodos gráficos, como box-plot e séries temporais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

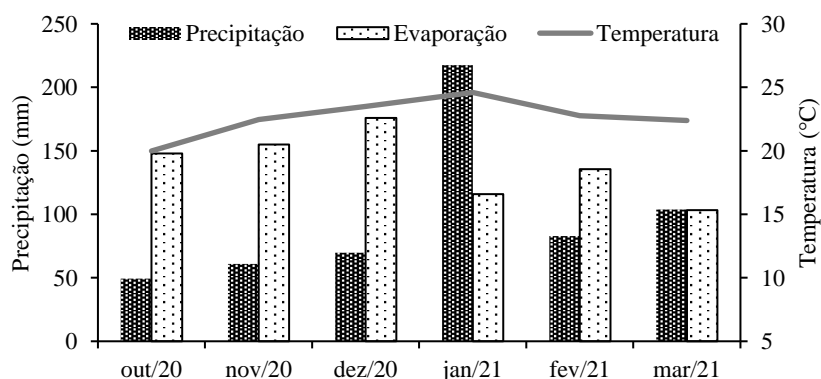
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos em relação ao sistema WCV-FS no que se refere ao desenvolvimento das macrófitas e sua influência nos processos hidrológicos, à perda de água real no sistema e à atuação dos processos hidrológicos no desempenho do tratamento.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS CLIMÁTICAS

A evapotranspiração de referência foi determinada em um período de seis meses, iniciado em 05 outubro de 2020 e concluído em 31 de março de 2021, sendo avaliados dias representativos da primavera e do verão. Já a evapotranspiração de cultura da *Canna x generalis*, foi determinada por um período de quatro meses, iniciado em 02 de dezembro de 2020 e concluído em 31 de março de 2021.

A Figura 27 mostra a média mensal da distribuição da precipitação, da evaporação e da temperatura monitoradas na ETE experimental ao longo do período de estudo (out/2020 a mar/2021). O volume total de precipitação observado ao longo deste período foi de 580,9 mm e de evaporação foi de 833,2 mm, sendo a temperatura média de 23,1°C, e a temperatura mínima registrada de 7,8 °C, em outubro, com temperatura máxima registrada de 38,8°C, em dezembro (INMET, 2021).

Figura 27 - Distribuição climatológica de totais mensais de evaporação, precipitação e temperatura média na ETE experimental, ao longo do período de monitoramento



Fonte: Autora.

A Tabela 2 apresenta as normais climatológicas e as médias mensais das variáveis climáticas disponibilizadas pelo INMET, assim como a precipitação acumulada para cada mês monitorado na ETE experimental ao longo do estudo.

Tabela 2 - Variáveis climáticas para os meses de outubro a dezembro de 2020 e de janeiro a março de 2021

Variáveis		Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.
Temperatura (°C)	N	19,40	21,60	24,10	24,90	24,00	22,90
	T _{méd}	19,99	22,47	23,50	24,59	22,76	22,38
	T _{máx méd}	25,89	28,39	30,13	30,96	29,18	28,58
	T _{mín méd}	14,09	16,56	12,21	11,95	11,51	11,11
Umidade relativa (%)	N	76,30	70,60	68,70	72,30	76,80	78,50
	UR _{méd}	71,71	66,20	69,22	71,68	78,71	78,79
Radiação solar (MJ.m ⁻² .d ⁻¹)	¹ N	19,00	21,90	23,00	21,70	20,60	17,70
	² Rad _{méd}	20,64	22,77	23,57	22,22	20,91	17,47
Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	N	2,40	2,40	2,30	2,30	2,10	2,00
	V _{v méd}	2,59	2,88	2,36	2,44	1,87	1,69
Precipitação total (mm)	N	173,30	132,70	154,30	166,30	139,60	127,70
	³ P	46,00	60,90	69,80	217,50	81,60	103,90

Notas: N = normais climatológicas do Brasil de 1981 a 2010; T: temperatura; UR: umidade relativa; Rad: radiação solar; V_v: Velocidade do vento; P: precipitação; ¹Normal climatológica de radiação solar do período de 1976 a 2005 (disponível no Atlas Climático do RS); ²Radiação solar média calculada por equação simples de **Hargreaves e Samani (1982)**; ³Precipitação acumulada de dados coletados *in loco*.

Fonte: Autora.

Os meses de outubro, novembro e dezembro de 2020 apresentaram baixa incidência de precipitação, com volume abaixo da normal climatológica; enquanto que os meses de janeiro, fevereiro e março de 2021 apresentaram maior volume pluviométrico. O mês de jan/21 registrou precipitação acima da média histórica, e em mar/21 o volume verificado ficou próximo ao da média histórica.

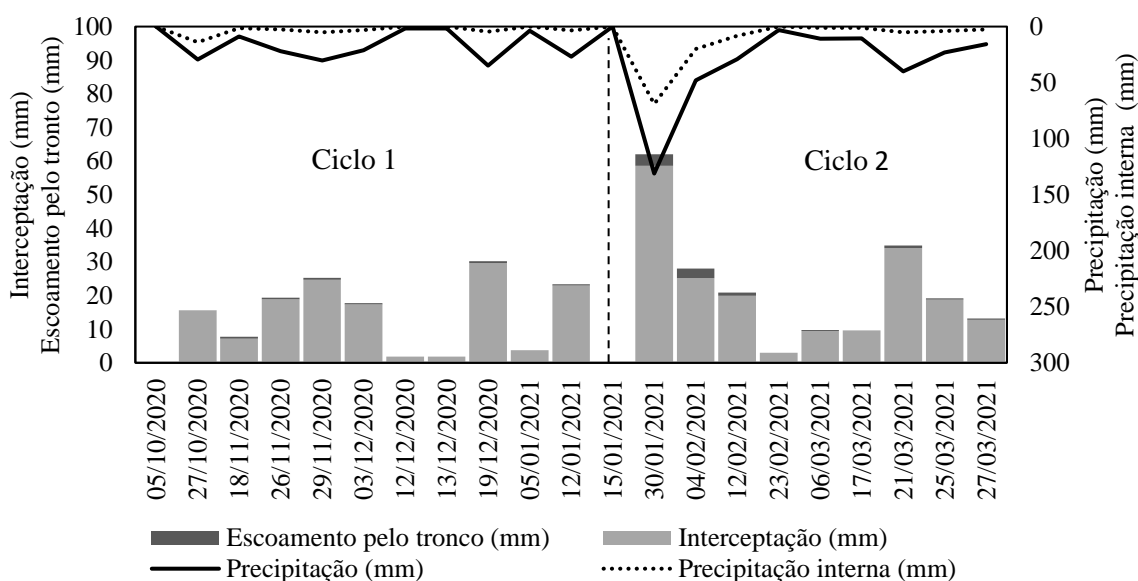
Em relação às demais variáveis climatológicas, observou-se que, de nov/20 a jan/21, os registros de elevadas temperaturas e de baixa umidade relativa do ar pode ter influenciado à perda de água por evapotranspiração. Os meses de fev/21 e mar/21 também registraram temperaturas elevadas, contudo, como a umidade relativa do ar foi alta, é possível que isso tenha influenciado nas taxas de evapotranspiração.

5.2 INTERCEPTAÇÃO DE MACRÓFITAS EM WCV-FS

O monitoramento da interceptação da macrófita *Canna x generalis* no WCV-FS, foi estimada ao longo de seis meses de monitoramento, tendo sido iniciado em 05 de outubro 2020 e finalizado em 31 de março de 2021. Este período de estudo foi dividido em dois ciclos, tendo ocorrido entre a primavera e o verão, resultando em nove coletas no C1 e oito coletas no C2, em razão da baixa incidência de precipitação.

Na Figura 28 são apresentados os valores médios de P_i , E_t e I , monitorados para C1 e C2. No C2, após o corte da vegetação, observou-se um volume elevado de precipitação, de precipitação interna, de escoamento pelo tronco e, conseqüentemente, de interceptação. Já o C1 apresentou poucos eventos de precipitação monitorados, contudo mostrou elevados volumes interceptados, os quais aumentaram conforme o desenvolvimento avançado da planta.

Figura 28 - Comportamento da P_i , E_t e I para diferentes P ao longo do monitoramento



Fonte: Autora.

Na Tabela 3 detalham-se os resultados do monitoramento com a *Canna x generalis* no WCV-FS, em termos da porcentagem dos valores totais, dos mínimos e máximos observados, das médias, do desvio padrão e da mediana de P , P_i , E_t e I desta vegetação. Todos os eventos de precipitação monitorados foram utilizados para quantificar E_t , independente do volume

incidente, uma vez que o escoamento tende a ser maior conforme o aumento da precipitação. Contudo, há que se considerar que a alteração de algumas características da vegetação (como folhas e caule) pode interferir na relação $P_x E_t$ de forma não linear.

Tabela 3 - Valores de P_i , E_t e a estimativa da I em porcentagem de P nos dois ciclos

Ciclo	Variável	Total	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão	Mediana
C1	P (mm)	180,00	1,80	34,70	24,67	8,51	26,70
	P_i (% de P)	18,95	11,56 (P=21,9mm)	47,33 (P=29,4mm)	19,15	12,62	15,38
	E_t (% de P)	1,72	0,26 (P=29,4mm)	6,91 (P=8,7mm)	2,32	2,13	1,73
	I (% de P)	79,66	52,41 (P=29,4mm)	86,11 (P=21,9mm)	85,66	13,98	85,69
C2	P (mm)	310,80	3,00	131,10	38,48	39,77	26,00
	P_i (% de P)	35,52	9,37 (P=10,7mm)	52,69 (P=131,1mm)	23,25	16,12	16,13
	E_t (% de P)	2,92	1,38 (P=10,6mm)	5,84 (P=47,9mm)	2,69	1,41	2,40
	I (% de P)	61,56	44,70 (P=131,1mm)	89,01 (P=10,6mm)	76,94	18,12	81,83

Nota: em relação aos máximos não foram considerados eventos de $I = 100\%$

Fonte: Autora.

É importante destacar ainda que, para duas coletas realizadas no C1, com $P = 1,80$ mm e com $P = 3,7$ mm, e para uma coleta efetuada no C2, com $P = 3,00$ mm, as precipitações incidentes foram totalmente interceptadas pelas macrófitas, resultando em $I = 100\%$ de P . Durante o C1, o volume médio precipitado foi de $24,6$ mm ($\pm 8,5$ mm), sendo que o evento de $P = 29,4$ mm apresentou o máximo valor de P_i monitorado ($47,33\%$ de P), o mínimo valor de E_t ($0,26\%$ de P) e a menor I ($54,41\%$ de P), o que se justifica por ser essa coleta monitorada 22 dias (no dia 27/10/20) após o corte das macrófitas, as quais estavam com folhas pequenas e em estágio inicial de desenvolvimento.

Desconsiderando-se os eventos com interceptação total da precipitação incidente, o evento com $P = 21,9$ mm (no dia 26/11/20) resultou no maior percentual interceptado ($86,11\%$ de P), e a menor P_i ($11,56\%$ de P). Percebe-se, portanto, que os máximos e os mínimos de P_i , I e E_t , foram encontrados em 52 dias de monitoramento, desconsiderando-se os registros de $I = 100\%$ de P .

A média de precipitação monitorada durante C2 foi de $38,48$ mm ($\pm 39,77$ mm), um volume bem superior aos registros verificados em C1 ($24,67 \pm 8,51$ mm). A maior precipitação foi de $131,1$ mm, ocorrida 15 dias após o corte da *Canna x generalis* (30/01/21), que também

resultou na maior P_i (52% de P) e na menor I (44,7% de P). No dia 04/02/21 (19 dias após o corte) ocorreu uma precipitação de 47,9 mm, registrando o maior E_t monitorado em C2 (5,84% de P).

Esses valores de P_i , I e E_t foram elevados em razão da ocorrência de um grande volume de precipitação nos primeiros dias de desenvolvimento da vegetação. Entretanto, no dia 17/03/21 (61 dias após o corte) ocorreu uma precipitação de 10,6 mm, em que foi registrada a maior I e menor E_t , de 89,01% de P e 1,38% de P, respectivamente. Logo, neste ciclo os máximos e os mínimos de P_i , I e E_t foram verificados em um intervalo de 60 dias de monitoramento, um período maior em relação ao ciclo anterior. Nesse caso, também foi desconsiderado os registros de $I=100\%$ de P.

A P_i apresentou maior variação no C2, com vários valores de P_i menores ou maiores do que a P_i média. Neste ciclo, as macrófitas se desenvolveram lentamente e várias folhas tiveram necrose, resultando em maior abertura nos dosséis, o que pode ter contribuído para a variabilidade observada. Por outro lado, o C1 mostrou menores variações nos valores de P_i , uma vez que a vegetação teve um bom desenvolvimento ao longo do estudo. Apenas ao final do ciclo, algumas folhas amarelas se manifestaram, seguido de necrose.

De modo geral, para o C1, as variações quantificadas de P_i foram de 17,56% a 47,33% de P, com média de 19,15% ($\pm 12,62\%$) de P. Já para C2, a P_i variou de 9,37% a 52,69% de P, com média de 23,25% ($\pm 16,12\%$) de P. Em estudos florestais, essas porcentagens podem ser ainda maiores. Del Campo *et al.* (2018), por exemplo, observaram valores máximos de P_i em torno de 86% de P e mínimos de 55% de P.

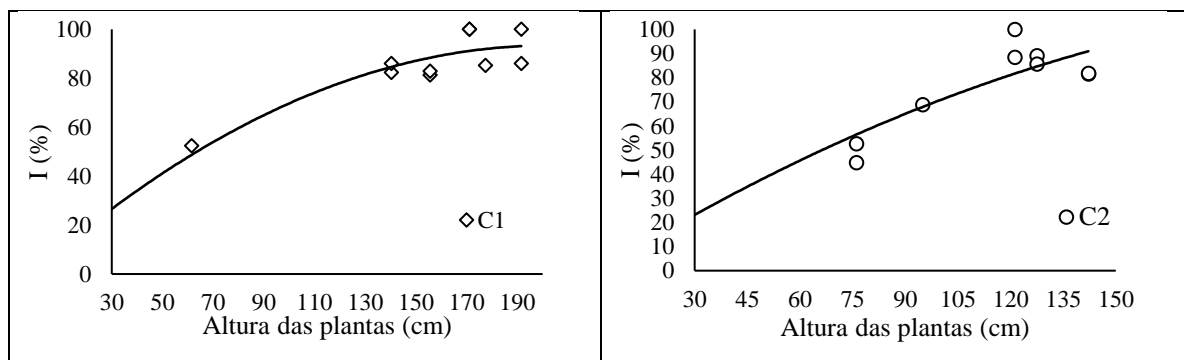
Para a *Canna x generalis*, o total o P_i observado foi igual a 18,95% de P e 35,52% de P, para C1 e C2, respectivamente. A variabilidade de volume e de intensidade nos eventos de precipitação podem ter resultado nas diferenças verificadas de P_i para a mesma vegetação (*Canna x generalis*). Pode ainda ter contribuído para essa variabilidade, o fato do experimento abarcar diferentes etapas de desenvolvimento da vegetação. Dessa forma, o maior crescimento das plantas no C1 pode ter proporcionado maior capacidade de armazenamento do dossel e, conseqüentemente, maior interceptação.

O escoamento pelo tronco, monitorado ao longo dos dois ciclos, variou de 0,26-1,99% de P, com média de 2,32% ($\pm 2,13\%$) de P, para o C1. Durante o C2, o escoamento de tronco médio observado foi de 1,38-2,61% de P, com média de 2,69% ($\pm 1,41\%$) de P. A interceptação estimada para as macrófitas foi de 85,69% de P e 76,94% de P, para C1 e C2, respectivamente. Estes valores foram superiores às interceptações registradas por Diniz *et al.* (2013), que observaram I igual a 22,11; 20,73 e 23,01% de P, para áreas de mata Atlântica de 20, 30 e 60

anos de regeneração, respectivamente. Já no estudo de Vaca, Van der Tol e Ghimire (2018) em monitoramento realizado em floresta de *Pseudotsuga menziesii* na Holanda durante duas estações de cultivo de 2015 e 2016, em clima temperado-úmido, encontraram interceptação estimada em 37 e 39% de P. Esses percentuais são dependentes das características da vegetação (formato da folha, largura e comprimento), dos eventos de precipitação e do estágio de desenvolvimento das plantas.

A Figura 29 mostra a relação da interceptação e da altura da *Canna x generalis* ao longo dos dois ciclos monitorados.

Figura 29 - Relação entre a interceptação e a altura da *Canna x generalis* para C1 e C2



Fonte: Autora.

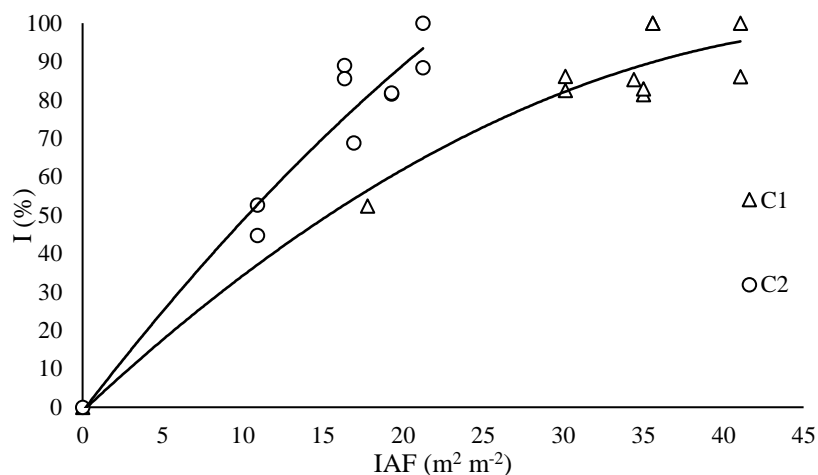
Nota-se que no C1, a interceptação foi aumentando de acordo com o crescimento da vegetação, isso porque as plantas mais altas tendem a ter maior quantidade de folhas e, portanto, maior probabilidade de interceptação da precipitação incidente. A I observada foi de 85% a 100% para a altura máxima de 191 cm da vegetação, que apresentava média de 6 folhas por perfilho. Em razão da dependência da precipitação para coleta de dados, não houve coletas para análises na fase de 62 cm a 140 cm de altura das plantas, com média de 5 folhas por perfilho. Conseqüentemente, para essa fase de desenvolvimento, não houve nenhuma estimativa de interceptação. Para uma altura média de 140 cm de altura e 5 folhas por perfilho, as plantas interceptaram cerca de 83% de P.

Para C2 na fase em que as plantas estavam com 76 cm de altura, observou-se interceptação de 44% de P. Já quando a vegetação estava com uma média de 121 cm de altura e 3 folhas por perfilho, a interceptação variou de 88% a 100% de P. No desenvolvimento

máximo das plantas, com média de 142 cm de altura e 4 folhas por perfilho, o total interceptado foi de 81% de P.

Embora o registro de menores valores do índice da área foliar tenha ocorrido para o C2, as porcentagens de interceptação foram semelhantes ao C1, como mostrado na Figura 30.

Figura 30 - Percentual de interceptação e o índice de área foliar da *Canna x generalis* para C1 e C2



Fonte: Autora.

Percebe-se que a interceptação aumenta à medida que o IAF também aumenta. Em três coletas no C1, o IAF foi próximo a 35 m².m⁻², a interceptação foi da ordem de 81%. Isto aponta características semelhante da vegetação (CxLxN) durante estas coletas utilizadas para o cálculo de IAF, embora a interceptação tenha sido estimada a partir da diferença entre o volume total de precipitação e os volumes de precipitação interna e escoamento do tronco, que variam de acordo com as características da vegetação, mas que são dependentes da variabilidade e intensidade de eventos de precipitação. Já o C2 apontou maior variabilidade quanto a I em relação ao IAF. Nota-se essa variabilidade nas três coletas com IAF em torno de 16 m².m⁻² e I de 69%, 86% e 89% de P, o que ressalta uma diferença nas características da vegetação, bem como nos eventos de chuva.

5.3 COMPORTAMENTO DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO NO WCV-FS

Neste item são apresentadas as taxas de evapotranspiração de cultura e de referência, sendo verificadas as relações existentes entre a evapotranspiração no WCV-FS e, entre a evaporação e a transpiração, ao longo do desenvolvimento da *Canna x generalis*. Por último, realizou-se também, a determinação do coeficiente de cultura da *Canna x generalis* e do coeficiente do TCA.

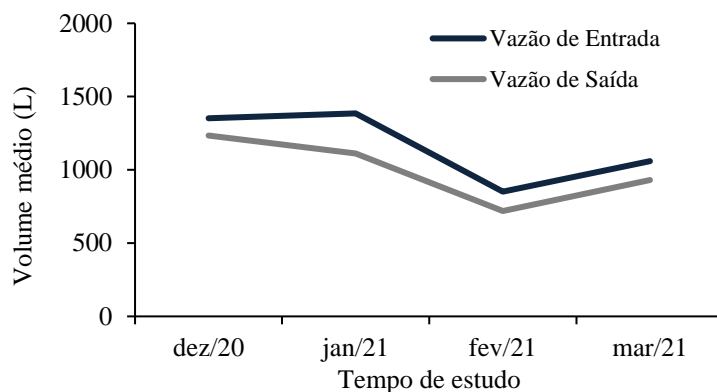
5.3.1 Evapotranspiração da *Canna x generalis* no WCV-FS

Nesse estudo, foi possível determinar a evapotranspiração de cultura (ET_c), diária e mensal, da *Canna x generalis* por meio de balanço hídrico dado pela diferença entre volumes afluentes e efluentes, conforme detalhado na metodologia (Item 4.3.6.1). Para estimativa da ET_c diária foram descartados os dias com volume de saída maior que o volume de entrada, obtendo-se uma ET_c média mensal. Para o mês de dezembro/20 foram considerados 17 dias, já para janeiro/21 foram considerados 12 dias, enquanto que para fevereiro/21 foram 10 dias e para março/21 foram 15 dias. Para os resultados observados, destaca-se o mês de janeiro/21, que apresentou o maior volume de perda (273,9 L) e o maior volume de entrada (1385 L), para valores médios de entrada e saída (Figura 31).

O sistema de WCV-FS mostrou uma média diária de entrada de efluente do TS de 1162 L.d⁻¹, sendo a média de saída de efluente de 998 L.d⁻¹ e a entrada média por precipitação de 106 L.d⁻¹. O volume total evapotranspirado pelo WCV-FS foi de 13,9 m³, equivalente a 27% do volume acumulado de entrada (51,14 m³). Headley et al. (2012), ao monitorar um WCH em escala piloto de setembro de 1999 a agosto de 2001, preenchido com cascalho basáltico, com vegetação do tipo *Phragmites australis*, em região subtropical na Austrália com precipitação média anual de 1822 mm, a temperatura média do ar de 19,3 °C e a umidade relativa do ar média de 73%, também observaram uma perda de água de 27%. Já no estudo realizado por Brasil e Matos (2008), em um sistema de WCH recheado com brita, plantado com taboa (*Typha sp.*) e desenvolvido em Minas Gerais/Brasil, os autores verificaram uma evapotranspiração que variou entre 11 % e 27%. Por outro lado, Carballeira, Ruiz e Soto (2016), ao monitorar cinco WCH em escala piloto, plantado com *Juncus effusus*, *Iris pseudacorus*, *Typha latifolia* L., *Phragmites australis* e sem vegetação, no período de outubro de 2009 a março de 2012, em região de clima temperado e úmido na Espanha, com temperatura entre 13 °C e 19 °C e

precipitação média de 0,7 a 8,3 mm por dia, os sistemas com vegetação apresentaram perdas de água entre 18,5% a 27,6%, um percentual próximo ao monitorado nessa pesquisa.

Figura 31 - Volume médio de entradas e de saídas no WCV-FS no período de estudo



Fonte: Autora.

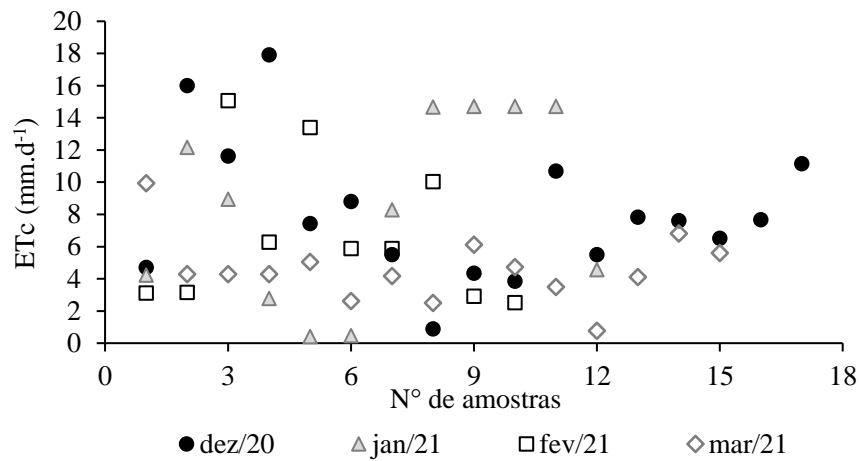
Na Figura 32 apresenta-se a variação da ET_c e a quantidade de amostras ao longo de quatro meses de monitoramento, junto com o diagrama de caixa associado. Neste período de dezembro/20 a março/2021, foram amostrados, no total, 54 dias, com valor médio de ET_c de 6,84 mm.d⁻¹.

Esse valor médio de ET_c está incluso na faixa de valores (desvio padrão $\pm 4,43$) obtidos no estudo de Schütte e Fehr (1992), de Queluz, Pereira e Sanchez-Román (2018) e de Frédette *et al.* (2019). A faixa de evapotranspiração encontrada por Schütte e Fehr (1992), por exemplo, para análise de um WCH na Europa variou entre 5 e 15 mm.d⁻¹ durante o verão. Já o monitoramento realizado por Queluz, Pereira e Sanchez-Román (2018), em um WCH plantado com *Typha latifolia*, em clima subtropical úmido do Brasil, de temperatura média de 22 °C no mês mais quente, mostrou perda de água de 4,9 a 20 mm.d⁻¹. O estudo de Frédette *et al.* (2019), por sua vez, para um sistema de WCH utilizado para o tratamento de lixiviado e plantado com salgueiro (*Salix miyabeana SX67*), desenvolvido no Canadá, resultou em evapotranspiração na faixa de 2 a 62,2 mm.d⁻¹, para uma precipitação média anual de 1000 mm e temperatura média anual de 6,8 °C.

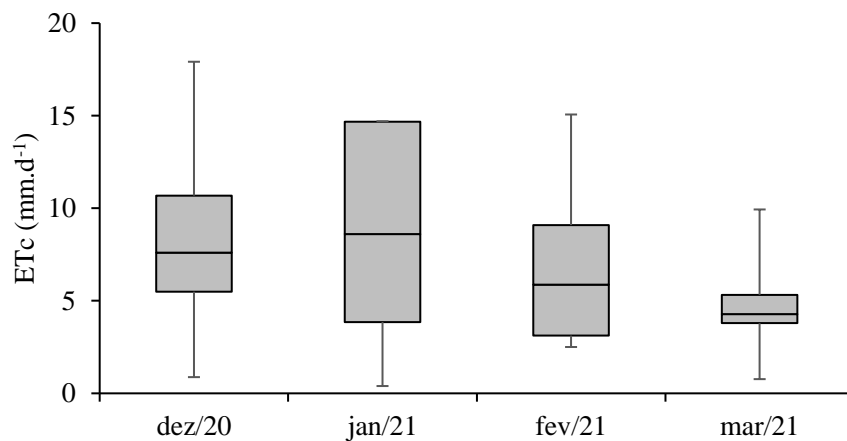
Por outro lado, alguns estudos com *wetlands* naturais, mostraram taxas de evapotranspiração superiores ao ET_c médio de 6,84 mm.d⁻¹, observado no monitoramento realizado nessa pesquisa. Zhang *et al.* (2018), por exemplo, estimaram uma evapotranspiração

de 10 mm.d^{-1} em um *wetland* natural plantado com *Scirpus triqueter* e *P. australis*, em clima semiárido da China, com precipitação média anual de 392 mm e temperatura média de $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Já o estudo de Granata, Gargano e Marinis (2020), também realizado em *wetland* natural, apresentou perdas de água de até 8 mm.d^{-1} , considerando monitoramento desenvolvido em clima subtropical úmido na Flórida, com precipitação média anual em torno de 1300 mm e temperatura média anual de $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 32 - Variação da evapotranspiração de cultura no sistema WCV-FS: (a) quantidade de amostras em quatro meses; (b) diagrama de caixas associados (box-plots)



(a)



(b)

Nota: Quatro dias do mês de janeiro de 2021 e em três dias do mês de março de 2021, foi somado o volume diário da vazão de entrada, vazão de saída e volume precipitado, juntamente com o volume interceptado pelas plantas. Resultando em ET_c média iguais para quatro e três dias, pois a precipitação nestes dias foi contínua, principalmente nos horários das coletas de interceptação.

Fonte: Autora.

Ao longo de todo o monitoramento, a faixa de evapotranspiração de cultura da *Canna x generalis* no WCV-FS variou entre 0,40 a 17,91 mm.d⁻¹, coincidindo com a faixa de perda de água de 0 a 50 mm.d⁻¹ observada por Tuttolomondo *et al.* (2014). Os autores monitoraram a evapotranspiração de um WCH plantado com junco gigante (*Arundo donax L.*) e junco guarda-chuva (*Cyperus alternifolius L.*) no oeste da Itália, em uma região de clima subtropical úmido, com temperatura média anual de 17,1 °C. No estudo, os maiores valores de perda de água foram observados durante a temporada de primavera-verão.

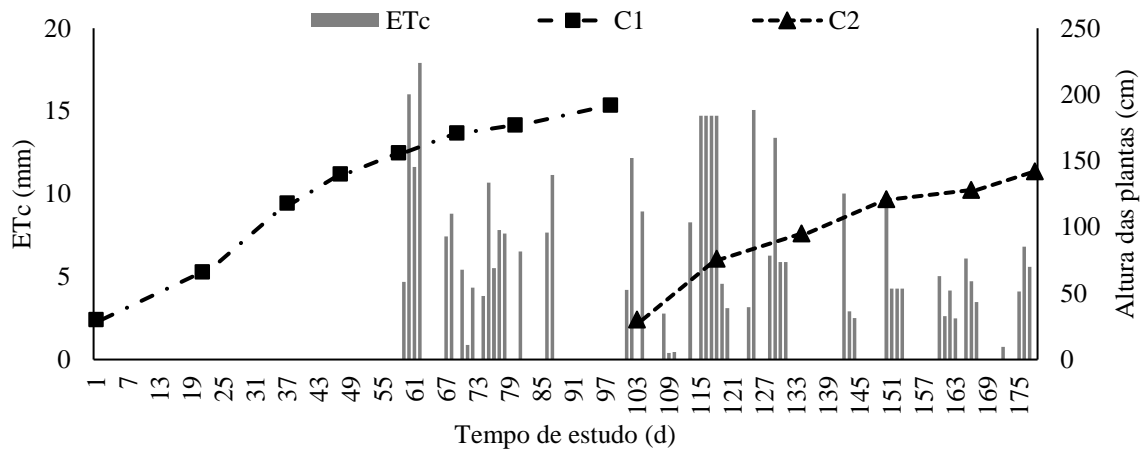
Nessa pesquisa, as maiores taxas de evapotranspiração foram encontradas no C1, com precipitação média de 2,14 mm ao dia e a temperatura média de 23 °C. Para o C2, a precipitação média foi de 5,48 mm ao dia e a temperatura média foi de 23 °C. Nesses casos, além da diferença nas condições climáticas do local, as altas taxas de perda de água no sistema de WCH podem estar relacionadas com a sua configuração, que demanda maior área de instalação comparado a um WCV-FS e ainda, em razão do tipo de escoamento presente, caracterizado por ocorrer de forma horizontal, com o nível do fluido permanecendo logo abaixo da superfície superior do material filtrante.

Estudos com *Canna spp.*, como por exemplo de Magalhães Filho *et al.* (2018), encontraram uma taxa elevada de evapotranspiração variando entre 10 a 40 mm.d⁻¹, ao monitorar uma bancada com sistema de tanque de evapotranspiração seguido de WCH plantado com *Canna spp.*, em clima tropical úmido, caracterizado por chuvas no verão e secas no inverno. Já o estudo realizado por Caputo *et al.* (2019) mostrou taxas de evapotranspiração de 2,2 mm.d⁻¹ a 2,8 mm.d⁻¹, em condições climatológicas abertas de temperatura média e precipitação média para dois períodos de monitoramento (1 e 2), caracterizados por 22,5°C e 2,13 mm.d⁻¹, 24,7 °C e 4,82 mm.d⁻¹, respectivamente. O experimento avaliou o desenvolvimento da *Canna x generalis* irrigada com água cinza clara, em escala piloto de vasos preenchidos com cascalho.

A determinação da ET_c iniciou 58 dias após o corte da vegetação no Ciclo 1, como pode ser observado na Figura 33. E embora as plantas estivessem em estágio avançado de desenvolvimento (altura de 156 cm), continham novos brutos e perfilhos inteiros com folhas verdes, o que poderia explicar a maior taxa de evapotranspiração observada, de 17,9 mm, nos primeiros dias de estudo. Brasil e Matos (2008), ao monitorar quatro sistemas de WC, dois desses sistemas apresentaram maiores taxas de ET_c, em razão que continham o maior número de brotos de taboa e, também por maior insolação diária e influência da ação das bordas na área monitorada.

Durante o C2, as maiores taxas de ET_c foram verificadas nos primeiros dias de desenvolvimento da vegetação, após o corte em 30 cm. E ao longo do desenvolvimento crescente das macrófitas, a ET_c registrou seu valor máximo para este ciclo, alcançando 15 mm.d^{-1} em 95 cm da *Canna x generalis*. A ET_c começou a diminuir quando se observou a estabilização do desenvolvimento da macrófita, na situação de ausência de crescimento de novas folhas.

Figura 33 - Comportamento da evapotranspiração de cultura da *Canna x generalis* e crescimento das plantas, no C1 e C2



Fonte: Autora.

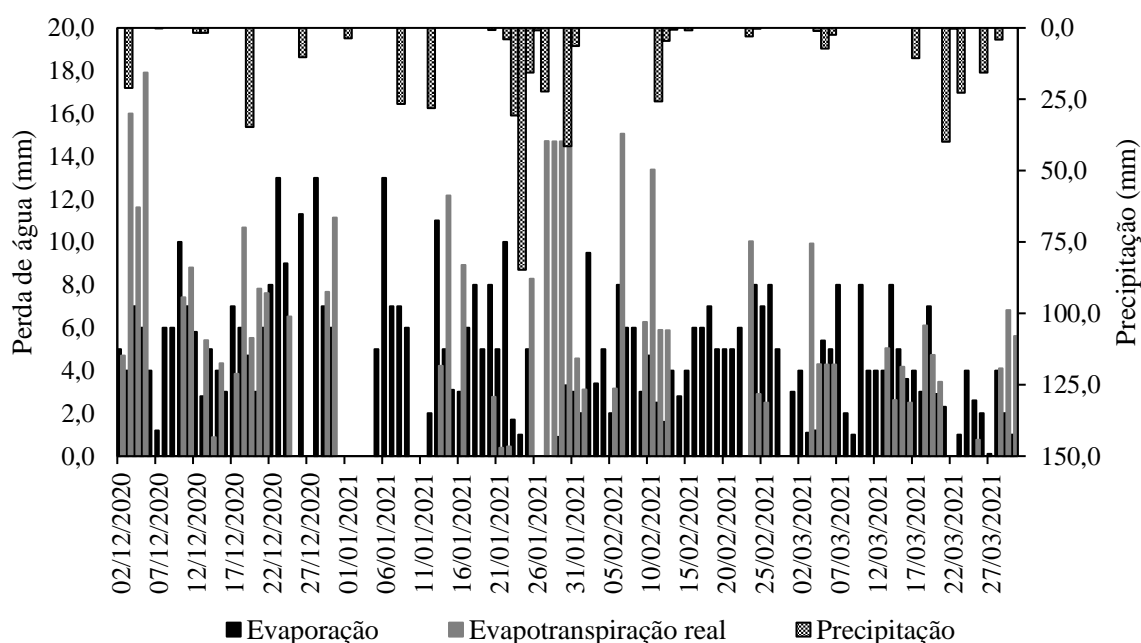
Conforme destacado anteriormente, as altas taxas de evapotranspiração podem ser afetadas pelos efeitos oásis e varal, sofridos pelo WCV-FS. No estudo em questão, a localização do sistema de WCV-FS facilita o efeito de oásis e de varal, uma vez que sua instalação se encontra em perímetro urbano, próxima à edificação em alvenaria, o que gera aumento do calor, intensificando o efeito oásis. Também pode contribuir para esses efeitos a presença de ruas pavimentadas próxima ao experimento, que devido ao fluxo de ar, potencializam o efeito varal. De fato, em períodos de baixa precipitação e de temperatura elevada, notou-se retardo no crescimento de plantas próximas às bordas de alvenaria, bem como a presença de várias folhas queimadas. Białowec, Albuquerque e Randerson (2014), Beebe *et al.* (2014) e Tuttolomondo *et al.* (2014) também observaram que os efeitos oásis e de varal influenciaram nas taxas de evapotranspiração em WCs.

A Figura 34 mostra o comportamento das taxas diárias de evapotranspiração de cultura e da evaporação do tanque classe A (TCA), juntamente com a precipitação correspondente ao período de monitoramento. A evaporação no TCA apresentou um intervalo sem monitoramento (de 28/12/20 até 05/01/21), devido ao recesso das atividades acadêmicas, bem como de falhas nos dias de chuva, em razão de extravasamentos ocorridos no TCA.

Em dias com eventos de precipitação, nota-se altas taxas de evapotranspiração de cultura e baixa evaporação. No entanto, é preciso notar que a disponibilidade ilimitada de água pode condicionar o estado de máxima ET de cada espécie (ALLEN *et al.*, 1998). De fato, como pode ser observado no dia 03/12/20, a precipitação monitorada foi de 21 mm, mas, apesar deste evento, o volume de perda por ET_c foi de 16 mm.d^{-1} , para E no TCA de 4 mm.d^{-1} , o que se justifica em virtude da disponibilidade de água, do pouco sombreamento e da temperatura elevada (temperatura máxima de $29,3 \text{ }^\circ\text{C}$).

Em virtude da alimentação intermitente de efluente (pulsos a cada 2 h) no WCV-FS e da camada filtrante com saturação de 30 cm, as plantas do experimento possuíam disponibilidade de água mesmo em dias secos. Dessa forma, considerando que a evaporação no leito de brita do WCV-FS fosse a mesma taxa de evaporação observada no TCA, a transpiração média corresponderia a 53% da ET_c e a evaporação média do TCA corresponderia 47% da ET_c .

Figura 34 - Comportamento da precipitação incidente, da evapotranspiração de cultura e da evaporação no TCA, ao longo do monitoramento



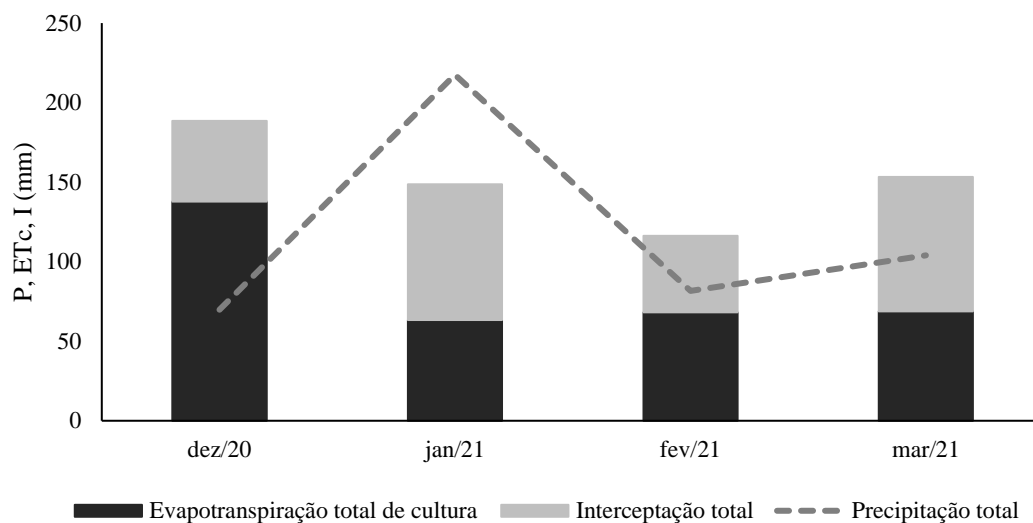
Zhang *et al.* (2018), usando balanço de massa isotópica em um *wetland* natural plantado com *Phragmites australis* (16,1%) e *Scirpus triquetter* (83,9%), encontraram uma evaporação equivalente a 60% da evapotranspiração, com transpiração de cada uma equivalente a 20% da evapotranspiração. Já estudo de Bois *et al.* (2021) mostrou que a transpiração das plantas em WCs pode atingir 26% da vazão de entrada, ao longo da estação mais quente do ano. Os autores ressaltaram o papel significativo da transpiração na projeção da infraestrutura, para o melhor desempenho na eficiência do tratamento e no fluxo de saída regular. Tais resultados demonstram a importância da análise das macrófitas no processo do balanço hídrico em WCs.

Em razão das altas taxas de perda de água por evapotranspiração no WCV-FS, no dimensionamento faz-se necessário a estimativa da área superficial desses sistemas, sendo importante considerar ainda, a evapotranspiração juntamente com a remoção de DBO₅ e DQO (SEZERINO; PELISSARI, 2021). Queluz, Pereira e Sanchez-Román (2018) destacam também que, a ET_c é essencial para o balanço de massa no WCH, uma vez que ela é responsável por contribuir para a redução no fluxo de saída, que por sua vez, ocasiona o aumento da concentração total de poluentes. Há que se considerar ainda, que quando a ET supera a vazão de entrada poderá ocorrer deficiência na drenagem de sais, colaborando para o acúmulo destes no perfil e na superfície do material filtrante (SERIGHELI *et al.*, 2019).

Nesse estudo, em decorrência do fundo saturado de 30 cm e da alimentação intermitente, as plantas possuíam alta disponibilidade hídrica (efluente), sendo esta a provável razão pela qual a evapotranspiração de cultura (338,2 mm) somada à interceptação (188,5 mm) resultou em valores superiores à precipitação acumulada (472,8 mm) para os meses de dezembro/20, fevereiro/21 e março/21.

A Figura 35 apresenta os acumulados de precipitação, de evapotranspiração real e de interceptação, ao longo do período de monitoramento. Pode-se notar que a perda de água foi maior no mês de dezembro/20 (137,86 mm) equivalente quase ao dobro de precipitação, embora, seja importante salientar que esse foi o mês com o maior número de dias monitorados e também, o mês onde o estágio de desenvolvimento das plantas estava mais avançado. O mês de janeiro/21 apresentou a maior precipitação acumulada (P=217,5 mm), resultando em uma interceptação de 39% de P e em uma evapotranspiração de cultura de 29% de P (desconsiderando o volume de entrada de efluente), as menores taxas de I e ET_c quando comparadas aos demais meses. Isso pode estar relacionado ao estágio inicial de desenvolvimento das plantas e do elevado volume de precipitação. No mês de março foi obtida a maior taxa de interceptação, 81% de P.

Figura 35 - Acumulados de precipitação, evapotranspiração real e interceptação ao longo do período de monitoramento



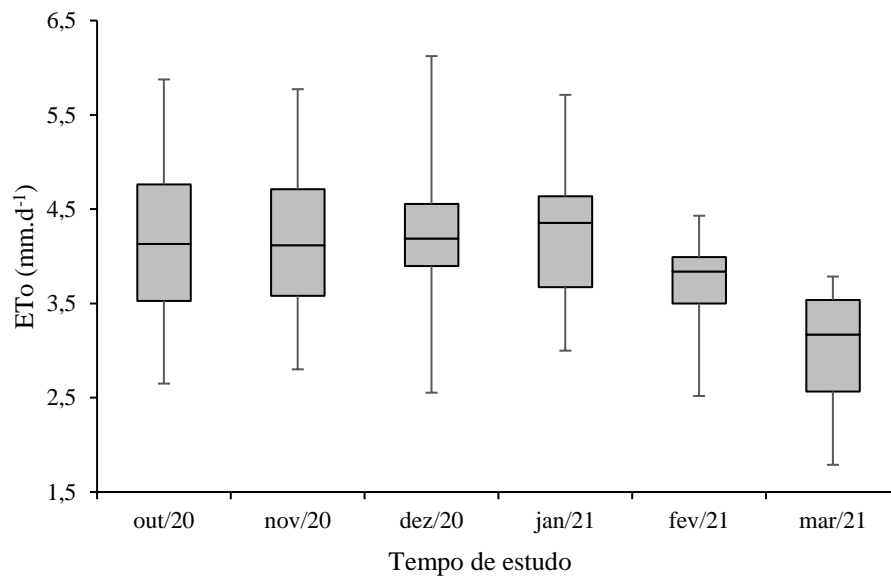
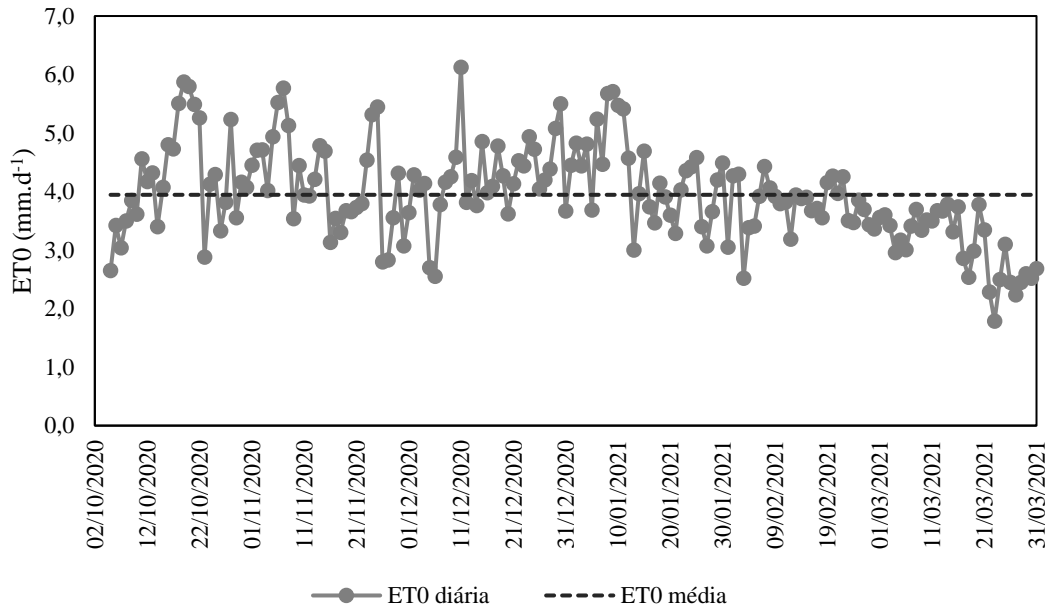
Fonte: Autora.

5.3.2 Taxas de evapotranspiração de referência e de evaporação diária

O comportamento da ET_0 ao longo dos seis meses de estudo (out/20 – mar/21), juntamente com o diagrama de caixa associado, apresentado na Figura 36. A maior taxa média de ET_0 diária estimada, calculada pela equação 3 de PM-FAO, ocorreu no mês de janeiro/21 ($4,25 \text{ mm.d}^{-1}$) e a menor taxa média diária em março/21 ($3,08 \text{ mm.d}^{-1}$). Para todo o período monitorado, a média de ET_0 observada foi de $3,94 \text{ mm.d}^{-1} (\pm 0,82)$, um valor 57% inferior à taxa média de evapotranspiração ($9,3 \text{ mm.d}^{-1}$) encontrada por Brasil e Matos (2008) em estudo com WCH, realizado em WCH, com vegetação do tipo taboa (*Typha sp.*).

Conforme mostrado na Tabela 5 (Item 5.3), o mês de jan/21 registrou baixa umidade relativa do ar (71,68 %), elevada temperatura média ($24,59 \text{ }^\circ\text{C}$) e alto volume de precipitação (217,50 mm), favorecendo a ocorrência de maiores taxas de perda de água. Apesar da ocorrência de baixa precipitação, os meses de out/20, nov/20 e dez/20 também apresentaram condições propícias para altas taxas de evapotranspiração. Por outro lado, nos meses de fev/21 e mar/21 houveram períodos de elevada temperatura média e umidade relativa do ar, o que dificultou o desenvolvimento de processos de evapotranspiração.

Figura 36 - Variação das taxas de evapotranspiração de referência pelo método de Penman-FAO. (a) ao longo do estudo; (b) diagrama de caixas associados (box-plots)



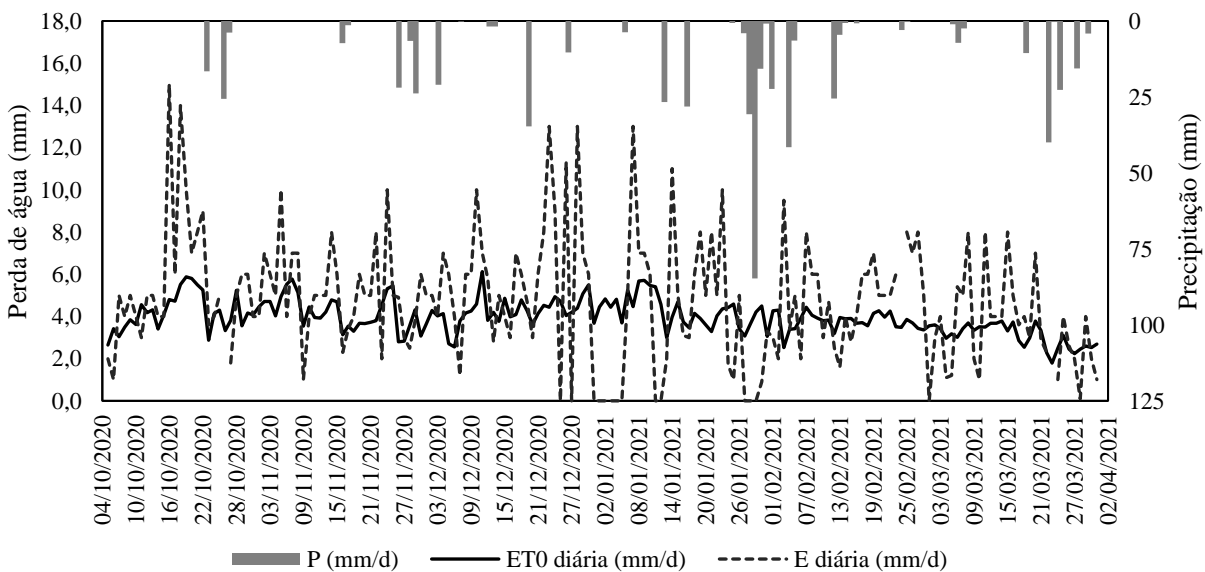
Fonte: Autora.

A Figura 37 apresenta o comportamento das taxas diárias de evapotranspiração de referência e de evaporação, juntamente com a precipitação registrada no período de monitoramento. As descontinuidades na linha de evaporação indicam dias em que ocorreu

extravasamento do tanque classe A, devido ao volume excessivo de chuvas, o que corresponde a 12 dias, representando um percentual de 7% da série avaliada.

Pode se observar que, as perdas de água por evaporação foram maiores do que as taxas de evapotranspiração em praticamente todo o período de estudo avaliado, o que, em períodos secos pode ser explicado em razão da exposição do TCA às variações climáticas. O período com maior evaporação ocorreu no início do monitoramento (no dia 05/10/20) até 23/10/20, com evaporação de 15 mm (no dia 16/10/20) e taxa de evapotranspiração de 5,88 mm (19/10/20), sendo que, a maior taxa de ET_0 estimada foi de 6,12 mm no dia 11/12/20, também em um intervalo longo sem incidência de precipitação. Da mesma forma, os primeiros dias secos, após ocorrência de chuva, apresentaram elevadas taxas de evapotranspiração e de evaporação, normalmente entre o terceiro e quinto dia.

Figura 37 - Comportamento das taxas de evapotranspiração de referência, da evaporação no TCA e da precipitação ao longo do monitoramento

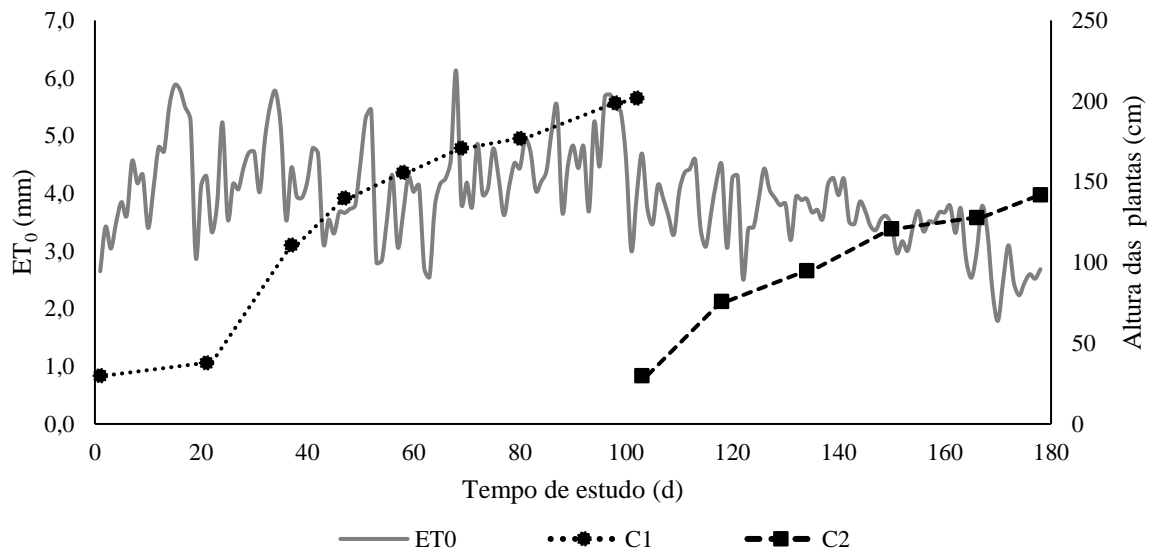


Fonte: Autora.

A ET_0 e o desenvolvimento das plantas não possuem uma correlação direta pelo método de PM-FAO (equação 3), pois em sua determinação são utilizadas as variáveis climáticas do local. Essas variáveis, por sua vez, podem influenciar no crescimento da vegetação. Em período de condições climáticas elevadas, por exemplo, são observadas maiores taxas de perda de água e um bom desenvolvimento das macrófitas, como mostrado na Figura 38. Ao longo do C2 de

monitoramento da vegetação, a temperatura média, a radiação solar e a precipitação da Tabela 3 (Item 5.2) foram inferiores em relação ao C1, essas variáveis climatológicas podem ter influenciado para menores valores de altura das plantas e das taxas de ET_0 .

Figura 38 - Comportamento da evapotranspiração de referência e o crescimento das plantas no C1 e C2



Fonte: Autora.

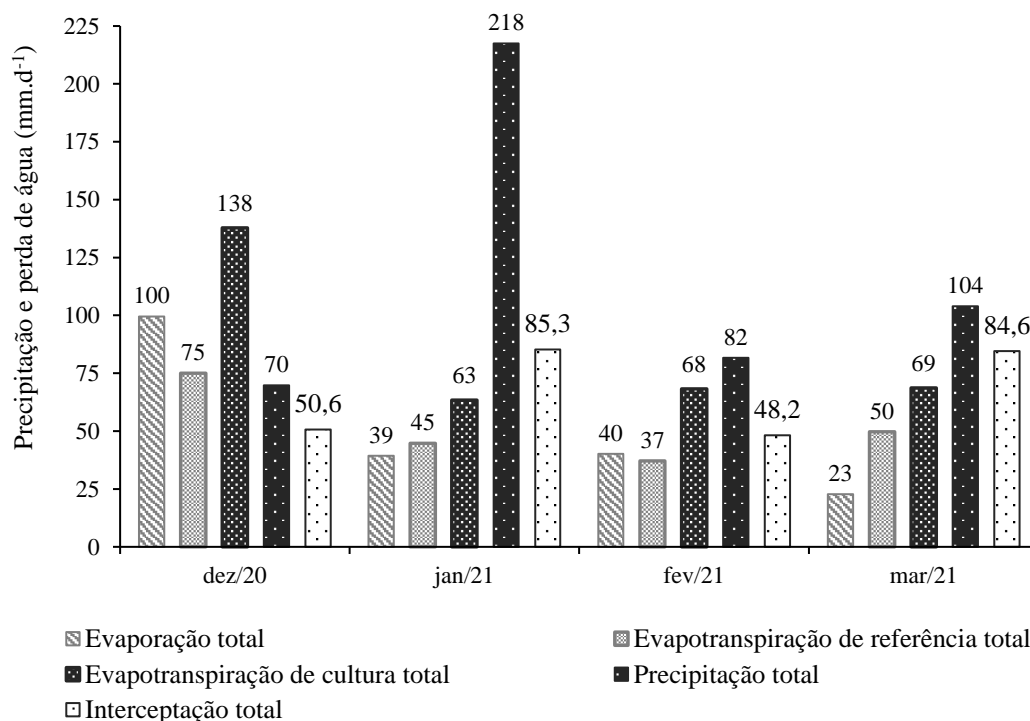
A Figura 39 mostra o comportamento das taxas mensais acumuladas de evapotranspiração de referência, de evapotranspiração de cultura e de evaporação, juntamente com a precipitação registrada durante os meses de monitoramento. Neste caso, a ET_0 e a E totais referem-se ao mesmo tempo do monitoramento de ET_c . Contudo, a entrada por precipitação foi considerada a precipitação total para cada mês, totalizando 473 mm para este período.

Os maiores totais de ET_c (137,9 mm), ET_0 (75,1 mm) e E (99,5 mm) foram determinados para o mês de dez/20, quando ocorreu menor volume de precipitação (69,8 mm). Nota-se a diferença de, aproximadamente, 62 mm entre volume da evapotranspiração real quantificada com dados *in loco* no sistema de WCV-FS e o volume calculado pelo método de Penman-FAO, para os mesmos 17 dias de dados válidos. O maior volume acumulado de precipitação encontrado foi de 217,5 mm em jan/21, no entanto a perda de água e a diferença entre taxas de ET_c e ET_0 diminuíram para, cerca de, 18 mm, comparado ao mês anterior. Neste mês, a ET_0 foi

de 44,68 mm e a ET_c foi de 63,26 mm, a menor registrada nos quatro meses de monitoramento. A partir de jan/21 até mar/21, o comportamento das perdas de água foram semelhantes, mas a ET_c continuou superior a ET_0 . Já os meses de fev/21 e mar/21 registraram o menor volume acumulado de precipitação.

Para todo o período de estudo, considerando apenas o volume total precipitado (472,8 mm), a evapotranspiração real correspondeu a 71,5% de P. É importante ressaltar, contudo, que, para este sistema de WCV-FS com 30 cm de saturação, a vazão afluyente média acumulada no WCV-FS foi de 4648,5 mm. Em dezembro/20, janeiro/21, fevereiro/21 e março/21 a vazão afluyente média foi de 1353,0 mm, 1385,6 mm, 851,6 mm e 1059,4 mm, respectivamente. Dessa forma, a ET_c resultante equivale a 6,60% dos volumes de entrada no sistema. Além disso, no referente a evapotranspiração de cultura, observou que, em todos os meses, ela foi superior à evapotranspiração de referência e à evaporação, sendo 38% maior quando comparado a ET_0 .

Figura 39 - Totais mensais de precipitação, de evaporação, de evapotranspiração de referência e da evapotranspiração de cultura ao longo do período monitorado



Fonte: Autora.

5.3.3 Coeficiente de cultura e de TCA

Na Tabela 4 são apresentadas as estatísticas descritivas para os coeficientes de cultura (K_c) da *Canna x generalis* e para o coeficiente do tanque classe A (K_t), obtidos ao longo do período de monitoramento, considerando para a estimativa da evapotranspiração da *Canna x generalis* situações de mesmas condições climáticas do estudo. Os valores de K_c e K_t são referentes ao período monitorado de 19 dias (início no dia 02/12/20) no C1 e 35 dias (início no dia 15/01/21) no C2.

O coeficiente de cultura médio para *Canna x generalis* encontrado ao longo do estudo foi de 1,87, com valores variando de 0,11 a 4,86. Esses valores são considerados muito superiores quando comparados com os coeficientes estimados para culturas agrícolas, que, comumente, variam entre 0,8 e 1,2 (ALLEN *et al.*, 1998). No entanto, quando comparados com estudos de WCs, os valores de K_c determinados nesta pesquisa são condizentes com os resultados obtidos por outros autores.

Brasil e Matos (2008), por exemplo, obtiveram K_c variando entre 2,22 e 5,58 para a macrófita taboa (*Typha spp.*), disposta em um WCH, preenchido com brita. Headley *et al.* (2012) monitoraram um WCH preenchido com cascalho, com vegetação do tipo *Phragmites australis*, em clima subtropical na Austrália e estimaram valores de K_c entre 1,9 a 2,6. Já Borin *et al.* (2011) realizaram o experimento no norte e sul da Itália em tanques de plástico, preenchidos com cascalho e plantados com a *Phragmites australis*, encontraram um K_c entre 2,3 a 8,5. O estudo de Queluz, Pereira e Sanchez-Román (2018) realizado em São Paulo/Brasil, clima subtropical úmido, também monitorou WCH em escala piloto, plantado com *Typha latifolia* e preenchido com brita, encontraram resultados de K_c entre 2,03 a 3,68.

Tabela 4 - Estatística descritiva para os coeficientes K_c e K_t , ao longo do período monitorado

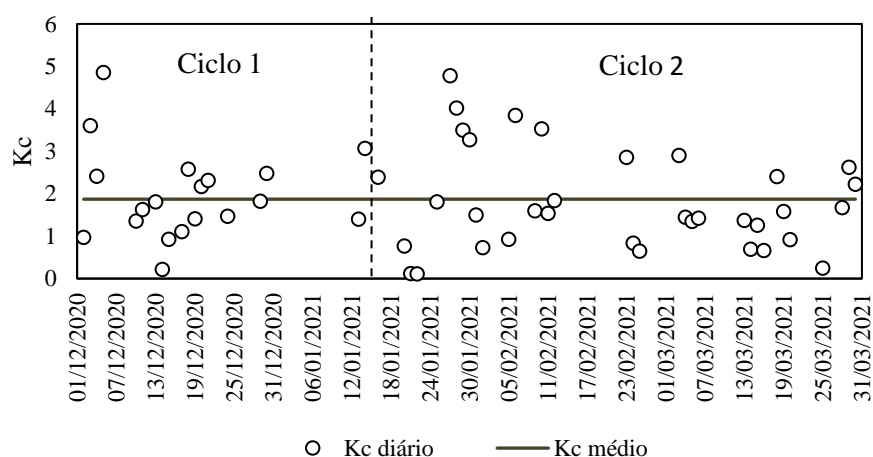
Mês	Média		Mediana		Desvio padrão		Máximo		Mínimo	
	K_c	K_t	K_c	K_t	K_c	K_t	K_c	K_t	K_c	K_t
Dezembro	1,95	1,52	1,81	1,26	1,09	0,96	4,86	4,00	0,22	0,18
Janeiro	2,23	1,17	2,10	0,32	1,53	1,03	4,78	2,88	0,11	0,05
Fevereiro	1,83	1,59	1,57	1,15	1,18	1,31	3,84	4,46	0,65	0,31
Março	1,52	1,57	1,42	1,39	0,75	1,20	2,90	3,90	0,25	0,19

Fonte: Autora.

A variabilidade diária do valor de K_c ao longo dos dois ciclos de desenvolvimento das macrófitas, é apresentada na Figura 40. Como pode ser observado, o início de cada ciclo é marcado por valores mais elevados comparado aos dias seguintes, o que se justifica por esse período ser caracterizado como um período de crescimento das plantas, as quais estavam, inicialmente, com 30 cm de altura. No C2 foi verificada maior variabilidade nos valores de K_c , visto que, neste ciclo o desenvolvimento da vegetação foi mais lento que o ciclo anterior, além do ciclo ter apresentado menor variabilidade das condições climáticas.

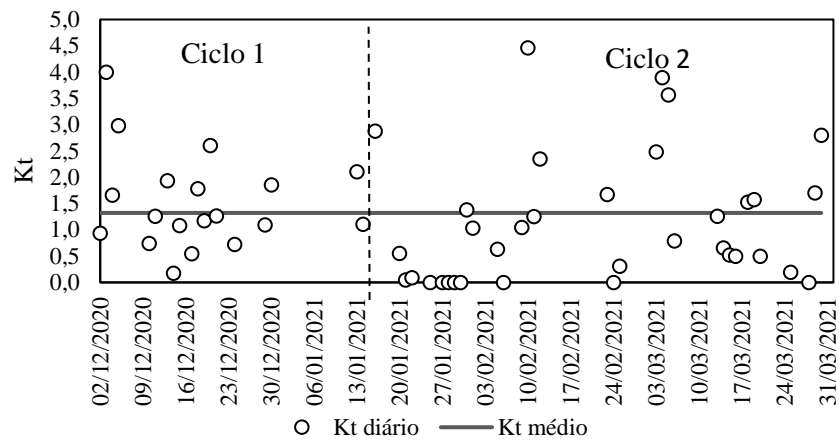
A floração durante o C1 teve início 26 dias após o corte (no dia 31/10/2020) e no C2 ocorreu 46 dias após o corte (no dia 02/03/2021). Desse modo, os valores de K_c indicaram uma tendência de queda, a qual se manteve com o início da senescência da vegetação nos dias 02/01/2021 (C1) e 20/02/2021 (C2).

Figura 40 - Valores de K_c monitorados ao longo do crescimento da *Canna x generalis* no C1 e C2



Fonte: Autora.

A Figura 41 apresenta os valores diários calculados de K_t para o C1 e C2. Observa-se que o maior valor de K_t encontrado foi de 4,46 (no dia 10/02/2021), ocorrido em temperatura média de 21,7 °C e máxima de 28,0 °C, assim como com radiação solar elevada. Alguns dias com incidência de precipitação e temperaturas elevadas indicaram alta evapotranspiração real e baixa evaporação, o que resultou em K_t elevado, embora o valor médio verificado tenha sido de 1,32, variando de 0,05 a 4,46, ao longo do período monitoramento.

Figura 41 - Valores calculados de K_t diários para o C1 e C2

Fonte: Autora.

Os valores obtidos para K_t podem ser utilizados para estimativas da evapotranspiração diária, sobretudo para sistemas com condições e climas semelhantes ao sistema avaliado nesse estudo. De fato, pesquisa realizada por Sousa, Faccioli e Netto (2016) evidenciou que os valores médios mensais de K_t podem ser utilizados para a estimativa da ET, com base nos dados de evaporação do tanque classe "A". Dessa forma, esse coeficiente pode também ser empregado para análises de sistemas de WCs, contribuindo para análises mais adequadas da destinação final do efluente, seja em corpos hídricos, para reuso ou ainda, para garantir descarga zero na saída.

5.4 MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO

Neste item são apresentados os resultados obtidos quanto ao desenvolvimento da macrófita *Canna x generalis* no WCV-FS, em relação às variáveis climáticas e à entrada de precipitação e efluente doméstico.

5.4.1 Desenvolvimento da *Canna x generalis*

O monitoramento do crescimento da macrófita *Canna x generalis* no *wetland* construído vertical de fundo saturado (WCV-FS) foi dividido em dois ciclos: C1, iniciando dia 05 de outubro de 2020 e concluído dia 14 de janeiro de 2021, totalizando 101 dias e; C2, iniciando

dia 15 de janeiro de 2021 e concluído dia 31 de março de 2021, totalizando 75 dias. Desta forma, foram avaliados dias representativos da primavera e do verão.

Na Figura 42 pode ser observado o desenvolvimento das macrófitas e o aumento da densidade de biomassa nos ciclos C1 e C2. No início de cada ciclo (após o corte) foi observado um rápido desenvolvimento da vegetação e o surgimento de novos brotos nas macrófitas, principalmente nas primeiras semanas. Também se verificou uma boa adaptação da vegetação aos pulsos de esgoto doméstico no WCV-FS (com 30 cm de saturação).

O desenvolvimento acelerado da *Canna x generalis* também foi verificado por Ramírez (2019), ao realizar monitoramento nesse mesmo sistema em estudo, operando como *wetland* construído de fluxo vertical descendente (WCVD). Comportamento similar foi percebido por Konnerup, Koottatepe e Brix (2009), em um sistema de WCH para tratamento de efluente domésticos, que possuía como meio filtrante a brita. Estudos de Lopes *et al.* (2019) e Montalvão (2019) realizaram comparativos de diversas espécies de plantas e observaram que a *Canna spp.* se sobressaiu no aumento do número de perfilhos e folhas. Na pesquisa de Lopes *et al.* (2019) monitoraram dois WCH, preenchidos com areia, brita e solo, plantados com helicônias e *Canna indica* e do capim *Tifton 85* para tratamento de esgoto doméstico. Montalvão *et al.* (2019) também verificaram a produtividade das gramíneas *Tifton 85* e Bengo e da planta ornamental *Canna indica* em WCH, preenchido com pedrisco, para tratamento de água residual de suinocultura.

Ao longo do C1 e do C2 foram realizadas coletas do efluente tratado na saída do WCV-FS, em dias de chuva e em dias secos. Em razão disso, ocorreram algumas interrupções na alimentação do sistema. Além disso, o C2 teve menor tempo de monitoramento (75 dias) e menor taxa de aplicação hidráulica ($TAH = 33,7 \text{ mm.d}^{-1}$), quando comparado ao C1, com 102 dias de monitoramento e TAH de $54,1 \text{ mm.d}^{-1}$. Há que se considerar também, que no C2, algumas folhas de diferentes perfilhos da *Canna x generalis* apresentaram cortes feitos pelas lagartas e outras manifestaram coloração amarelada ocorrendo, logo em seguida, necrose dessas folhas, possivelmente ocasionada pela falta de nutrientes provenientes do esgoto, essenciais para seu crescimento. Apesar destas condições e das variáveis climáticas elevadas neste ciclo, com temperatura média de $23,8 \text{ }^\circ\text{C}$, a vegetação continuou se desenvolvendo. Tanaka *et al.* (2015) observou comportamento semelhante para a *Canna spp.* em WCs, quando disposta a baixa disponibilidade de esgoto sanitário. Sendo assim, nota-se que a *Canna x generalis* continuou crescendo, suportando às condições climatológicas adversas e tolerando poluentes do esgoto, bem como a escassez hídrica.

Figura 42 - Monitoramento fotográfico do crescimento da macrófita *Canna x generalis*

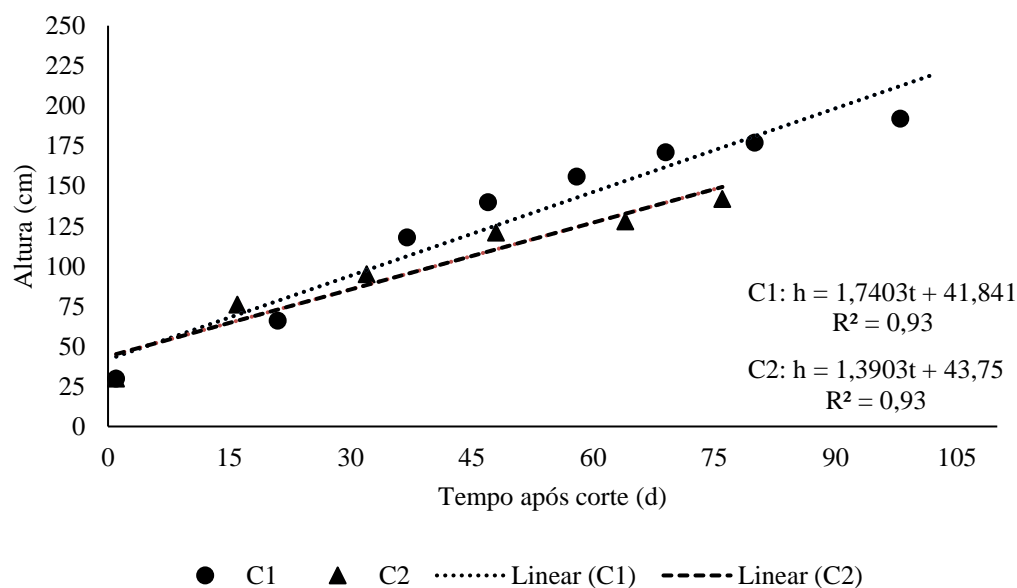
Fonte: Autora.

Durante o monitoramento, foram encontradas as taxas de crescimento médias, em relação à altura das plantas, de 11,7 cm por semana e 10,5 cm por semana para o C1 e C2, respectivamente. As datas de C1 e C2 monitoradas neste trabalho foram semelhantes ao período de monitoramento de P2 e P3 realizado por Ramírez (2019), respectivamente. No entanto, o autor obteve a maior taxa de crescimento no P3, de 11,1 cm por semana, enquanto para o mesmo período (C2), durante o verão e início do outono, obteve-se, nesse estudo, a menor taxa de crescimento. Sendo assim, é possível que a posição dos perfilhos e a diferença no sombreamento entre as plantas tenha influenciado no crescimento da *Canna x generalis* na análise realizado em C2.

A Figura 43 apresenta o desenvolvimento das plantas baseado nas linhas de tendência linear (regressão linear) para os dois ciclos (C1 e C2) monitorados, mostrando um comportamento inicial semelhante. Porém, o C1 apresentou maior inclinação em virtude do maior crescimento em um menor intervalo de tempo, quando comparado a C2.

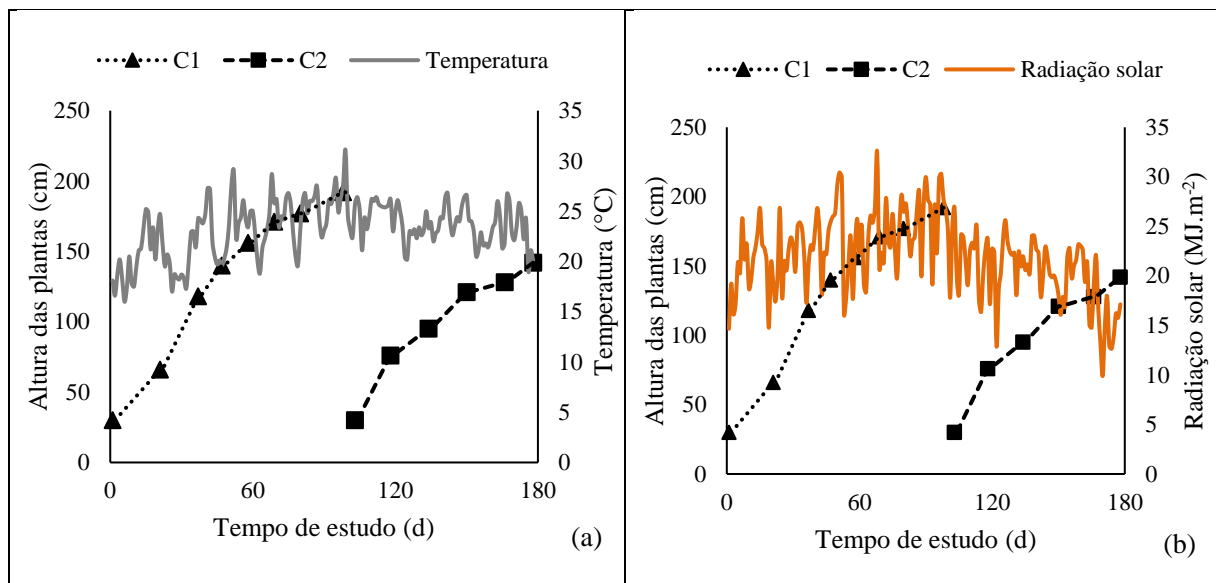
As equações resultantes mostram a relação entre a altura das macrófitas (h), em metros, e o tempo após o corte (t), em dias, para ambos os ciclos e podem ser utilizadas para estimar o crescimento das macrófitas em relação ao tempo, quando as condições operacionais e o período de tempo forem os mesmos dos apresentados neste estudo.

Figura 43 - Desenvolvimento da *Canna x generalis* após o corte em dois ciclos de monitoramento



A taxa de crescimento da vegetação pode estar relacionada com a variação das condições climáticas. Na Figura 44 apresenta-se o crescimento das plantas durante o C1 e C2, em relação às variações da temperatura e da radiação solar.

Figura 44 - Desenvolvimento da *Canna x generalis* e variação das condições climáticas. (a) temperatura; (b) radiação solar

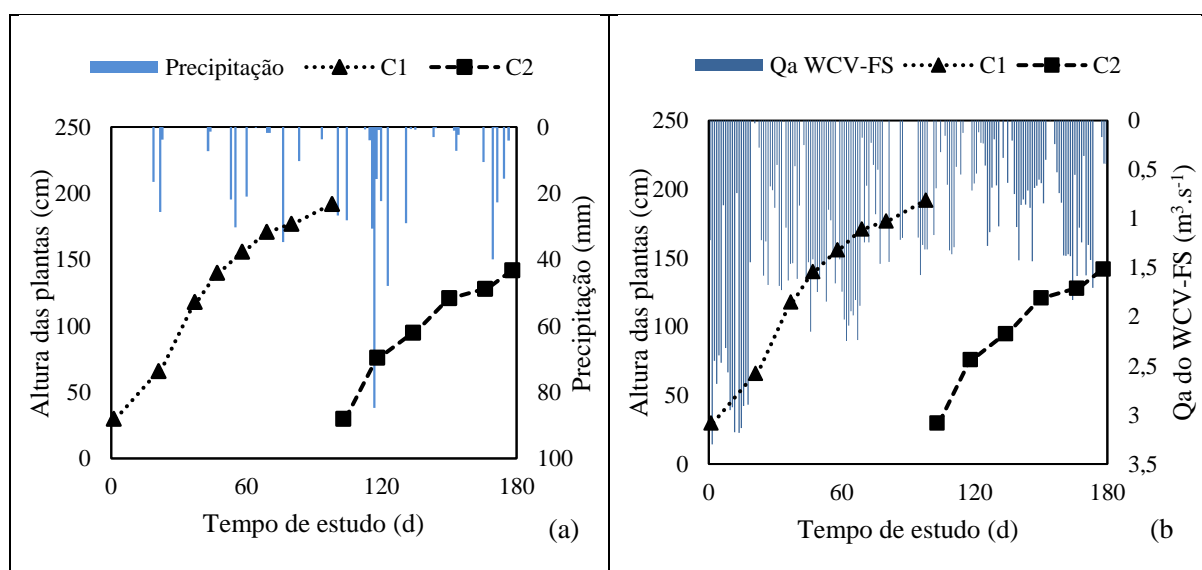


Fonte: Autora.

Os valores médios de temperatura e de radiação solar foram de 22,9 °C e 23,8 MJ.m⁻², e de 23,8 °C e 19,9 MJ.m⁻², para o C1 e C2, respectivamente. O C1 (maior taxa de crescimento) compreendeu boa parte da primavera e início do verão, mostrando temperatura média menor e radiação solar maior, em relação as observadas em C2, que mostrou menor taxa de crescimento. O estudo realizado por Ramírez (2019) mostrou menor taxa de crescimento (de 5,4 cm por semana) em temperatura média de 14,90 °C (parte do outono e todo o inverno) e, por outro lado, uma maior taxa de crescimento (de 11,1 cm por semana) em temperatura média de 23,38 °C (maior parte do verão e início do outono). Apesar do monitoramento do C2 ter compreendido boa parte do verão e início do outono, igualmente ao P3 monitorado por Ramírez (2019), o crescimento do C2 foi inferior ao P3, o que pode ter sido uma consequência da diferença na posição dos perfilhos escolhidos e também, da radiação solar recebida, em razão do sombreamento entre os perfilhos.

A distribuição de água também pode influenciar na taxa de crescimento das plantas, principalmente em sistema de WCV-FS e plantados com macrófita adaptada a ambientes aquáticos. A Figura 45 mostra o crescimento das macrófitas durante os dois ciclos de estudo, em contraste com a distribuição de precipitação e de vazão afluente ao WCV-FS.

Figura 45 - Desenvolvimento da *Canna x generalis* e a distribuição de águas. (a) precipitação; (b) vazão afluente ao WCV-FS



Fonte: Autora.

Para o C1 foram obtidas as médias de precipitação e a vazão afluente de 2,14 mm ao dia e 1323 L ao dia, respectivamente. Já para C2 observou-se 5,48 mm ao dia de precipitação e vazão afluente de 729 L ao dia, respectivamente. O C1 apresentou baixa precipitação, com média diária muito inferior aos valores de C2 (Figura 45a), sendo que a primeira precipitação aconteceu 20 dias após o corte, e a incidência de chuva se manteve reduzida até o início do C2. Nos primeiros 15 dias de monitoramento do C1, estava programado automaticamente uma entrada de esgoto de 3000 L ao dia, em razão da recirculação do efluente de saída do WCV-FS para o tanque séptico. Por este motivo, a vazão média de efluente do C1 foi próxima ao dobro dos valores de C2 (Figura 45b). Dessa forma, enquanto o C1 teve maior disposição de nutrientes, devido a elevada vazão afluente ao WCV-FS, no C2 a precipitação foi alta nos primeiros dias de desenvolvimento da vegetação, ou seja, a saturação de fundo (30 cm) e a alimentação intermitente de efluente podem ter fornecido os nutrientes necessários para o

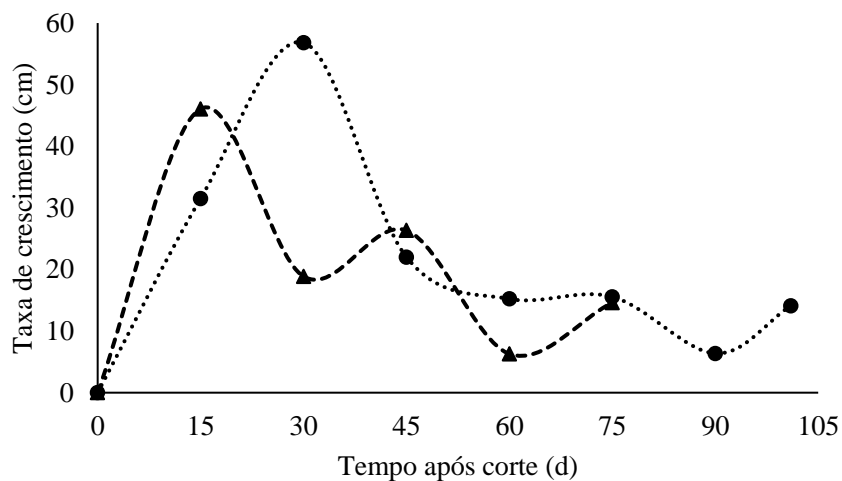
crescimento das plantas. De fato, estudo de Santos *et al.* (2018) mostrou que a saturação de fundo de 40 cm propiciou um ambiente adequado para o crescimento da macrófita *Typha domingensis*.

Com base nos resultados apresentados anteriormente, nota-se uma correlação e proporcionalidade entre a taxa de crescimento das macrófitas e a variação dos parâmetros climáticos (temperatura e radiação solar), bem como a distribuição de precipitação e de efluente, ou seja, o clima quente, o fornecimento ininterrupto de efluente e a precipitação regular influenciam no desenvolvimento das plantas. Embora nesse estudo, o monitoramento da *Canna x generalis* tenha sido realizado em altas temperaturas, Ramírez (2019) monitorou a evolução da vegetação em baixas e altas temperaturas, verificando menor taxa de desenvolvimento ao longo do inverno.

Segundo Gao *et al.* (2014) a temperatura é um fator limitante no desenvolvimento das plantas, uma vez que as baixas temperaturas diminuem o metabolismo das plantas e as atividades enzimáticas.

Na Figura 46 são apresentadas as variações da taxa de crescimento, ao longo do tempo de monitoramento, para o C1 e C2, exposto de forma quinzenal, a partir do início de cada ciclo.

Figura 46 - Monitoramento da taxa de crescimento da *Canna x generalis* ao longo do estudo



Fonte: Autora.

A maior taxa de crescimento foi de 0,56 m, observada em 30 dias (quarta semana) após o corte, e de 0,46 m, em 15 dias (segunda semana) após o corte, para o C1 e C2,

respectivamente. O C2 apresentou uma variação da taxa entre os 30 e 75 dias após o corte, aumentando e diminuindo de forma irregular, enquanto o C1 teve uma diminuição da taxa entre 30 e 90 dias após o corte, e um aumento da taxa no último monitoramento (101 dias após o corte).

O estudo de Ramírez (2019) mostrou que a *Canna x generalis* atingiu seu máximo crescimento (altura constante) em um intervalo de tempo aproximado de 2,5 meses, ao longo da primavera e do verão. Contudo, o C1 e C2 do presente trabalho não apresentaram uma estabilização da taxa de crescimento próximo a zero. No monitoramento realizado por Yang *et al.* (2007), a *Canna x generalis* apresentou taxas de crescimentos de 5 a 11 cm por semana, valores superiores quando comparado com as macrófitas *Typha latifolia*, *Phragmites communis*, que mostraram um crescimento de 4,4 e 6,8 cm por semana, respectivamente. No entanto, os autores avaliaram apenas a altura da vegetação e não consideraram os fatores que podem interferir nesse desenvolvimento, tais como: fatores climáticos, condição operacional do WC, alimentação de efluente, material utilizado como suporte, entre outros.

5.4.2 Área foliar da *Canna x generalis*

As medidas das macrófitas para os dois ciclos monitorados são apresentadas na Tabela 2. Percebe-se que C1 teve os maiores valores médios de altura, comprimento e largura quando comparado ao C2. Como em 101 dias de monitoramento, o C1 também apresentou maior taxa de crescimento (11,7 cm por semana) comparado aos 10,5 cm por semana do C2, observados em 75 dias de monitoramento, conclui-se que, possivelmente, o maior tempo de monitoramento tenha permitido o alcance da altura máxima pelas plantas monitoradas em C1. Contudo, nesta mesma estação de tratamento de esgoto experimental, o monitoramento realizado por Ramirez (2019), com perfilhos da *Canna x generalis* localizados nas bordas laterais em um WCVD, apontou que, durante a primavera e/ou verão, a altura da *Canna x generalis* estabiliza em sua altura máxima, em um intervalo de 75 dias. Dessa forma, pode ser que, por outros condicionantes, neste mesmo tempo de monitoramento, a vegetação no C2 não tenha atingido o crescimento máximo.

No estudo de Ondoy *et al.* (2020) realizado nas Filipinas com quatro diferentes *Canna spp.* cultivares e dois híbridos, sobre a morfologia e citogenéticas das plantas, as folhas atingiram comprimento médio de 38,23 cm e largura média de 17,86 cm, a altura da planta variou de 95,67-172,67 cm. Para Zsilane-Andre, Somogyi, Holb (2017) em três anos de estudos no leste da Hungria com a *Canna x generalis* plantada em solo argiloso, utilizando três

tratamentos químicos (tiofanato de metila, pó de carvão e controle) e regadas com água duas vezes por ano, as plantas atingiram uma altura de 160,50 cm.

Tabela 5 - Valores de máximo, de mínimo e da média (desvio padrão) das dimensões lineares e altura da *Canna x generalis* para os dois ciclos

Variável (cm) \ Ciclo	C1			C2		
	Média (DP)	Máximo	Mínimo	Média (DP)	Máximo	Mínimo
Altura (h)	137,37 (45,05)	220	32	112,40 (28,64)	153,0	53,0
Comprimento (C)	41,31 (9,57)	60	11	37,46 (9,31)	56,0	9,50
Largura (L)	18,92 (3,92)	26	5,5	15,57 (3,50)	24,0	4,0

Fonte: Autora.

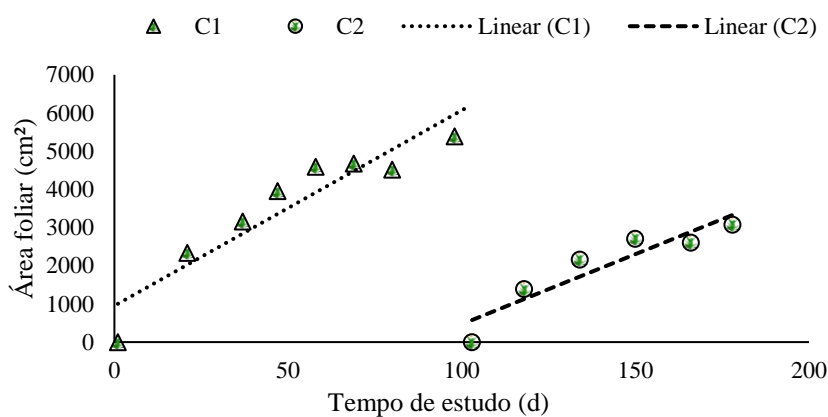
As dimensões das folhas variaram para ambos os ciclos, bem como a quantidade de folhas. Foram contabilizadas, em média, 5 folhas por perfilho durante todo o C1 e 4 folhas por perfilho para todo o C2. No C1 o comprimento e largura máximas da folha foram de 60 cm e 26 cm, respectivamente. Já no C2, o comprimento e largura máximas da folha foram de 56 cm, 24 cm, respectivamente. A diferença de comprimento e largura entre o C1 e C2 pode ter sido ocasionado na maior vazão na entrada de efluente e maior tempo de monitoramento no C1 comparado ao C2. Contudo, no estudo de Zsilane-Andre, Somogyi, Holb (2017) realizado na Hungria por três anos com a planta em solo e regado duas vezes ao ano, o número de folha variou de 13,9 a 23,1.

As dimensões das folhas e a altura da *Canna x generalis* apresentaram um aumento nas primeiras semanas, o que resultou na elevação da área foliar (AF), conforme pode ser observado nas linhas de tendência linear (regressão linear) para ambos os ciclos (C1 e C2), apresentadas na Figura 47. No C1, a macrófita teve um rápido desenvolvimento em um maior tempo, o que poderia explicar o maior coeficiente da linha de ajuste, quando comparado com o C2. O C2, por outro lado, apresentou um crescimento lento em um menor intervalo de tempo, mostrando menor coeficiente da linha de ajuste linear da equação em comparação ao C1.

O avanço temporal da área foliar (cm²) e o número de folhas da vegetação é mostrado na Figura 48. Percebe-se um comportamento crescente da área foliar da *Canna x generalis* para os dois ciclos, chegando a 5.393 cm² no C1 e 3.075 cm² no C2, respectivamente. Porém,

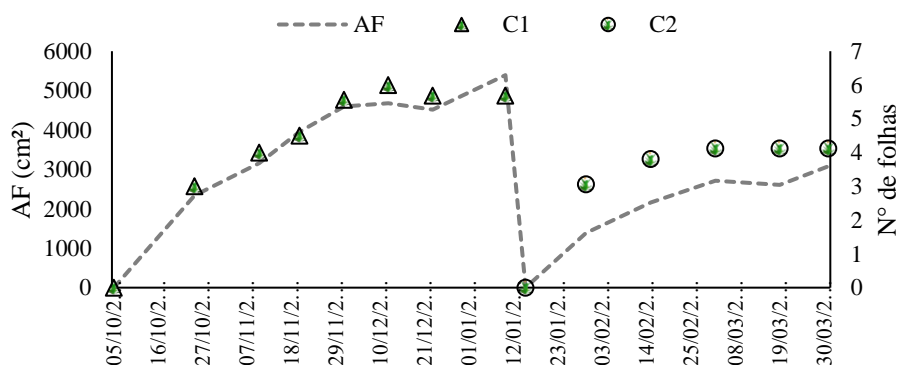
observa-se que no C1, em 60 dias após o corte, a planta atinge seu crescimento máximo, iniciando o período estável em relação ao comprimento, à largura e ao número de folhas, bem como no referente à área foliar. Já em C2, percebe-se um comportamento crescente até a última coleta das dimensões das folhas e da altura das plantas, possivelmente porque a vegetação não alcançou o máximo desenvolvimento, sendo a quantidade de folhas superior ao comprimento e à largura das folhas, resultando em uma área foliar abaixo do esperado.

Figura 47 - Evolução temporal da área foliar da *Canna x generalis* após o corte em dois ciclos de monitoramento



Fonte: Autora.

Figura 48 - Comportamento da área foliar e o número de folhas ao longo dos dois ciclos de estudo



Fonte: Autora.

Peiter, Robaina e Parizi (2006), ao estudarem a planta ornamental *Kalanchoe blossfeldiana* Poelln, encontraram uma área foliar de 1000 cm², distribuída em um total de 55 folhas. Nesse caso, a planta monitorada apresentava características de largura, de comprimento e de quantidade de folhas distintas daquelas observadas para a *Canna x generalis*, resultando em parâmetros inferiores aos relatados nesse estudo. Já Sharma e Sinha (2016) destacam que a evolução da *Canna spp.* resulta em alta taxa de crescimento e grande área foliar.

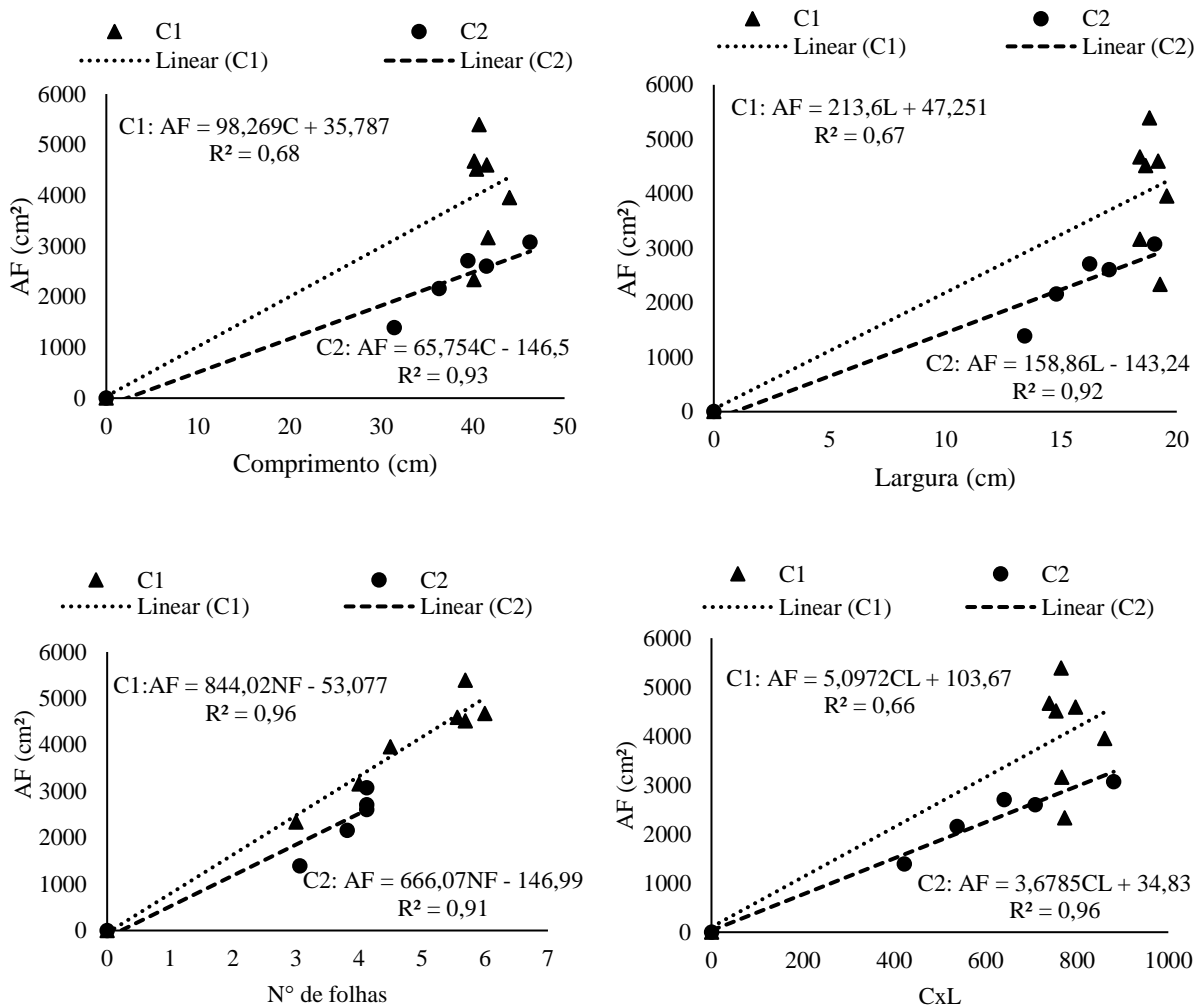
A Figura 49 apresenta os gráficos da área foliar (AF) estimada pelos modelos de regressões utilizados. As regressões lineares demonstram que existe boa correlação entre a AF e as dimensões lineares média das folhas, bem como com o número de folhas. O modelo para previsão de AF da *Canna x generalis*, que utiliza o número de folhas no C1 e o modelo de AF em função do produto do comprimento e da largura das folhas (CxL) no C2, apresentaram a maior proporcionalidade. A partir do momento em que o desenvolvimento da vegetação se estabiliza no C1, a área foliar também tende à estabilização, sofrendo alteração apenas em decorrência de variações no número de folhas.

O C1 apresentou R² baixo nas relações de AF x comprimento, de AF x largura e de AF x comprimento-largura (CxL). Apenas o número médio de folhas (NF) por plantas resultou em um elevado R² (0,97), sendo o menor R² observado de 0,67, para o modelo de AF em função do produto do comprimento médio pela largura média das plantas (CxL). Isso se justifica porque, em estágio avançado de desenvolvimento da planta, compreende-se que as folhas estavam em completo desenvolvimento e, portanto, sem grande variação nas dimensões, ocorrendo apenas o aumento no número de folhas de influência sobre a área foliar.

Por outro lado, o C2 exibiu R² elevado em todas as relações de ajuste. No modelo que utilizou o produto do comprimento pela largura das plantas (CxL), verificou-se o maior R² (0,97), enquanto o menor R² observado foi de 0,91, quando utilizado o modelo de AF em função do número médio de folhas (NF). Neste caso, o desenvolvimento do comprimento proporcional à largura das folhas teria influenciado o valor de AF, bem como a quantidade de folhas presentes.

Observa-se no C1, que o desenvolvimento do comprimento e da largura das folhas não ocorreu de forma linear, pois estando com as mesmas dimensões (40 cm de comprimento médio e 19 cm de largura média) resultou em maiores valores médios da área foliar, ou seja, neste período de crescimento avançado a quantidade de folhas fora determinante para este aumento da AF. O comportamento do comprimento e da largura no C2 foi ao contrário, aconteceu de forma crescente, assim como a área foliar, e o número médio de folhas estabilizou em quatro por perfilho.

Figura 49 - Regressão linear entre a área foliar e o comprimento, a largura, o número de folhas e CxL da *Canna x generalis*



Fonte: Autora.

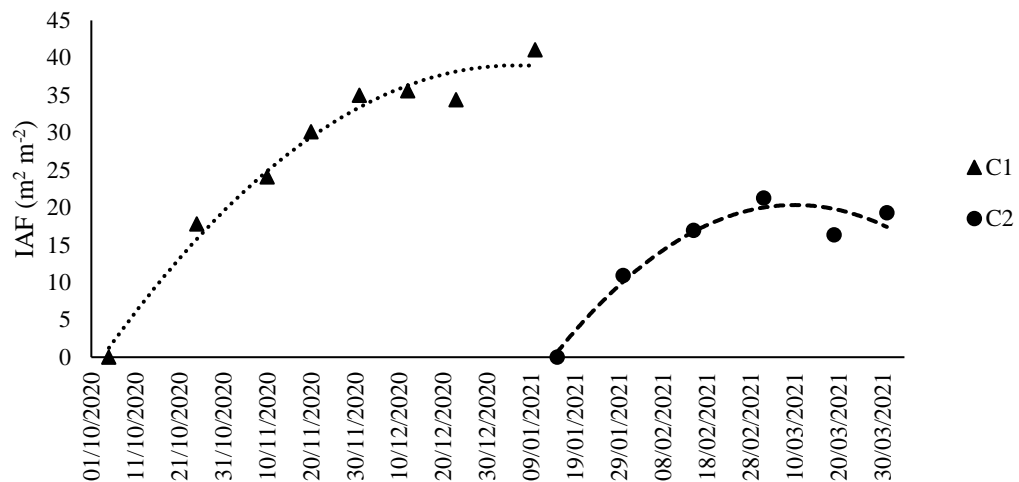
5.4.3 Índice da área foliar da *Canna x generalis*

A estimativa do índice de área foliar (IAF) foi determinada conforme a quantidade de perfilhos presentes, em relação a área superficial do WCV-FS (24,5 m²). O número de perfilhos contabilizado no início de cada ciclo, variou de 1865 perfilhos no C1 para 1921 perfilhos no C2.

Na Figura 50 apresenta-se a variação do índice de área foliar ao longo do monitoramento, para os dois ciclos analisados. Percebe-se que, durante os 101 dias de monitoramento do C1, o máximo IAF encontrado foi de 41 m².m⁻² e, nos 75 dias do C2, o IAF

máximo foi de $21,25 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$, ou seja, constatou-se, aproximadamente, o dobro de índice de área foliar do primeiro ciclo para o segundo.

Figura 50 - Variação do índice da área foliar ao longo do monitoramento, para os dois ciclos analisados



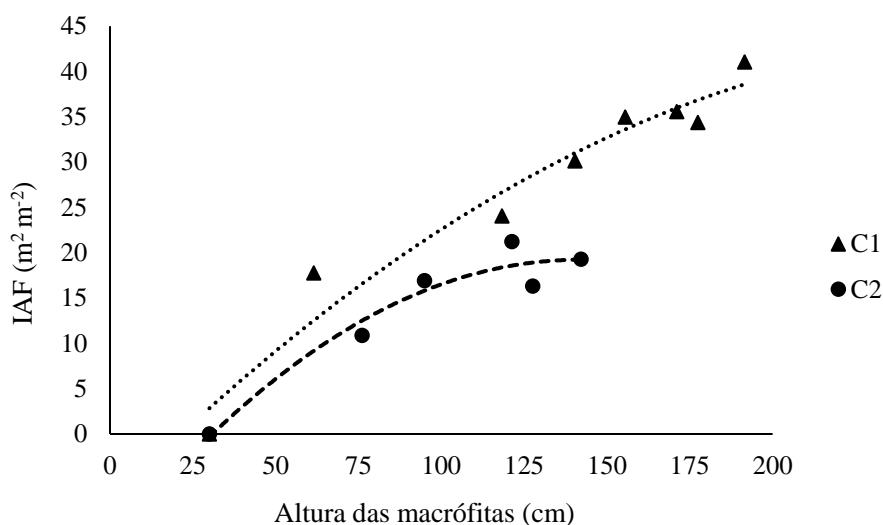
Fonte: Autora.

Para ambos os ciclos, foi possível observar um aumento do IAF de forma crescente até um período de declínio, possivelmente em decorrência da necrose de algumas folhas das macrófitas. Em seguida à necrose, ocorreu o crescimento de novas folhas e, conseqüentemente, um novo aumento do IAF. O C1 mostrou a maior taxa de desenvolvimento (11,7 cm por semana), apresentando um rápido crescimento das plantas e o desenvolvimento das folhas já no início do monitoramento. Em virtude desse bom desenvolvimento da macrófita, os valores de comprimento, de largura e do número de folhas estabilizaram após atingir o crescimento máximo da vegetação, o que ocasionou, por consequência, a tendência de estabilização do IAF. Nota-se que, por outro lado, o desenvolvimento das folhas e da altura da vegetação foi lento ao longo do C2, com menor taxa de desenvolvimento da vegetação (10,5 cm por semana), em comparação ao C1, alcançando uma ascensão do IAF no final do monitoramento, uma vez que estava ocorrendo mais necrose do que crescimento de novas folhas.

A Figura 51 mostra a variação do índice da área foliar em relação à altura da *Canna x generalis*. Observa-se que, ao longo do C1, o crescimento em relação à altura da *Canna x generalis* foi crescente e o IAF acompanhou este desenvolvimento, atingindo o índice máximo de $41 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ quando as plantas estavam com 191 cm de altura. Neste mesmo ciclo, o menor

índice encontrado foi de $18 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ para 61,5 cm de vegetação. Ou seja, existe uma correlação positiva entre a altura das plantas e o IAF. Isso pode ser notado mesmo a altura não fazendo parte do modelo de cálculo do IAF, analisando em dependência do comprimento, da largura e do número de folhas, entretanto, a altura da planta reflete na quantidade de folhas, assim como em suas dimensões.

Figura 51 - Variação do índice da área foliar em relação à altura da *Canna x generalis*



Fonte: Autora.

Já em C2, a altura da vegetação e o IAF apresentaram pouca variação, sendo que, após 100 cm de altura, o IAF praticamente ficou constante. Quando a vegetação estava com 121 cm de altura foi atingido o máximo IAF ($21,25 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$), uma vez que, na máxima altura verificada para as plantas (142 cm), o IAF foi de apenas $19 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$. Sendo assim, é possível perceber que se faz necessário um bom desenvolvimento das plantas e a presença de grande quantidade de folhas para um alto valor de IAF. Os valores menores de IAF e da altura das macrófitas estão relacionados ao crescimento da *Canna x generalis*, tendo-se em vista que a altura observada para a vegetação foi menor no C2, quando comparado ao C1, bem como quando analisados os resultados dos demais estudos realizados anteriormente neste mesmo sistema.

5.5 DESEMPENHO DO WCV-FS EM TERMOS DE DQO

A remoção de matéria orgânica carbonácea foi avaliada em termos de Demanda Química de Oxigênio total (DQO_t) afluente e efluente ao WCV-FS. A finalidade desta avaliação foi verificar a influência da incidência de precipitação no desempenho do WCV-FS, em termos de DQO, em dias com chuva, e em relação a evapotranspiração, em dias secos, isso porque a evapotranspiração está associada ao desempenho satisfatório em WCs (SEZERINO; PELISSARI, 2021).

Os valores obtidos quanto a matéria orgânica carbonácea ao longo do tempo de monitoramento e os diagramas associados destacando a distribuição dos valores, são apresentados na Figura 52. O *box plot* mostra que a variação da concentração afluente ao WCV-FS e as concentrações efluentes ao WCV-FS foram levemente semelhantes, indicando baixo desvio padrão, com dias secos apresentando maior variabilidade em relação aos dias de chuva.

As concentrações de DQO_t efluentes ao WCV-FS variaram entre 1,44 e 95 $mg.L^{-1}$, com média de 41 $mg.L^{-1}$, em dias de chuva e; de 8,11 a 121 $mg.L^{-1}$, com média de 55 $mg.L^{-1}$, em dias secos. Os resultados obtidos para os dias secos foram um pouco superiores aos valores encontrados em dias de chuva. Santos *et al.* (2018), trabalhando com WCV-FS (40 cm de saturação), obtiveram uma concentração de DQO de 45,7 $mg.L^{-1}$, resultado aproximado com os verificados neste trabalho (41 $mg.L^{-1}$ e 55 $mg.L^{-1}$).

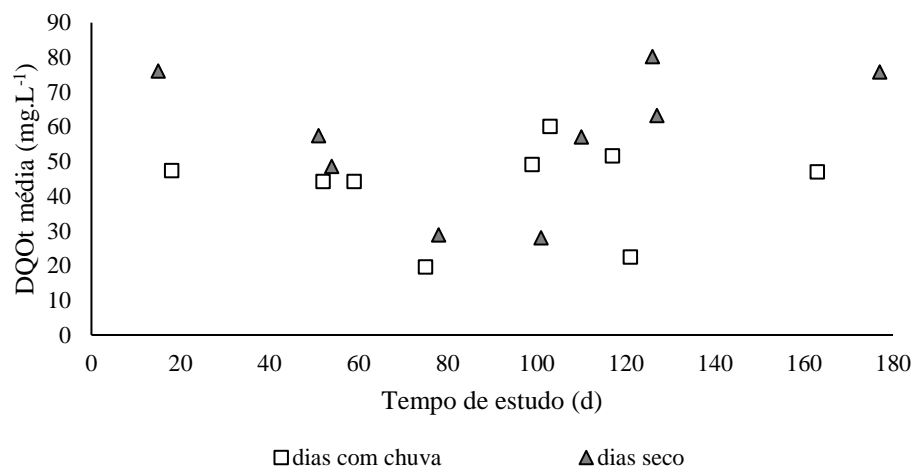
Von Sperling e Sezerino (2018) citam que o aumento da concentração de poluentes no meio líquido é causado pela expressiva perda de água para atmosfera. Dessa forma, a perda de água em dias secos, pode ter aumentado a matéria orgânica carbonácea, enquanto que nos dias de chuva, ocorre a diluição do efluente pela entrada de precipitação, resultando em menores concentrações.

Na Figura 53 apresenta-se a concentração de DQO afluente e efluente ao sistema de WCV-FS, para dias com chuva e dias secos. Para ambas as situações, observa-se uma variação da DQO afluente ao WCV-FS, em razão de uma provável entrada de efluente bruto no TS pouco antes da ocorrência do teste.

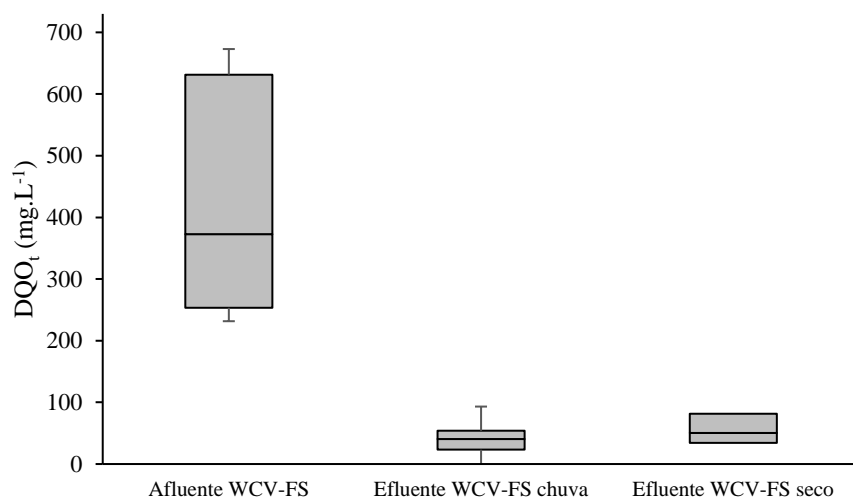
Embora esta variação de DQO afluente ao WCV-FS em dias de chuva até dia 80, a concentração efluente ao WCV-FS teve um desempenho semelhante em todas as coletas, como pode ser observado na Figura 53a. Isso porque, a entrada de precipitação em um sistema de WCV-FS pode amortizar a concentração na saída e diminuir a taxa de detenção hidráulica (TDH), apesar do tempo de repouso antes da incidência de precipitação para realização do teste, especialmente em razão da capacidade de armazenamento no fundo do efluente e/ou da chuva.

De modo geral, essas unidades apresentam maior capacidade de remoção que os WCV, em virtude de sua capacidade de acumulação e adsorção de SST na camada saturada (DONG; SUN, 2007).

Figura 52 - Variação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) média efluente ao sistema de WCV-FS. (a) ao longo do estudo; (b) diagrama de caixas (box-plot) afluente e efluente ao WCV-FS



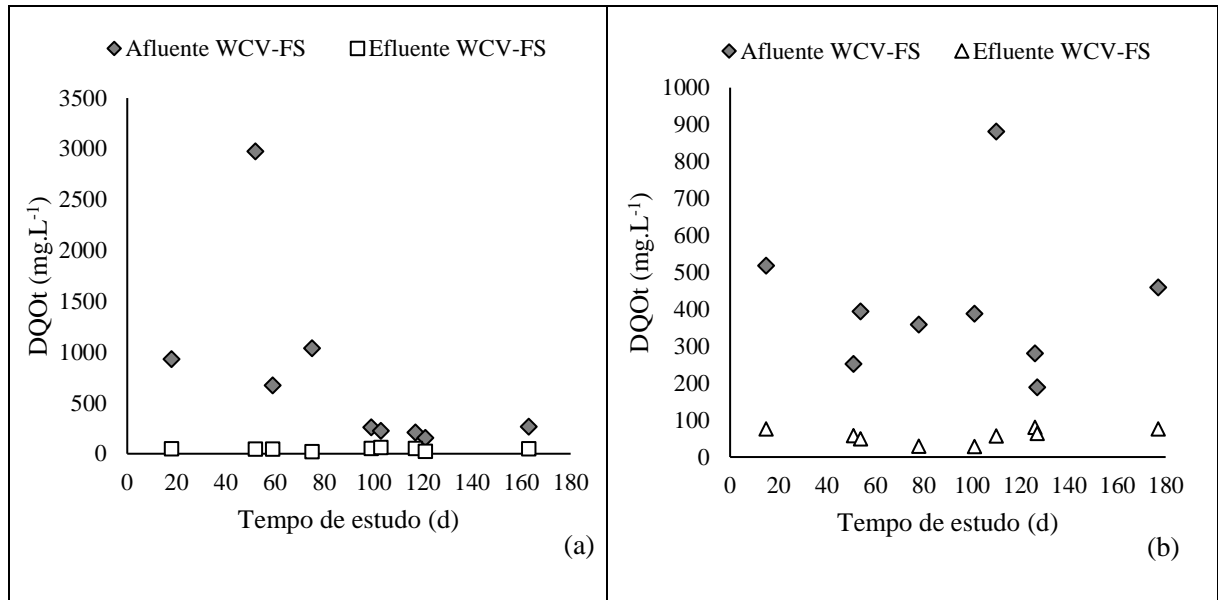
(a)



(b)

Fonte: Autora.

Figura 53 - Variação da Demanda Química de Oxigênio (DQO) no WCV-FS ao longo do tempo de monitoramento. (a) para dias de chuva; (b) para dias seco



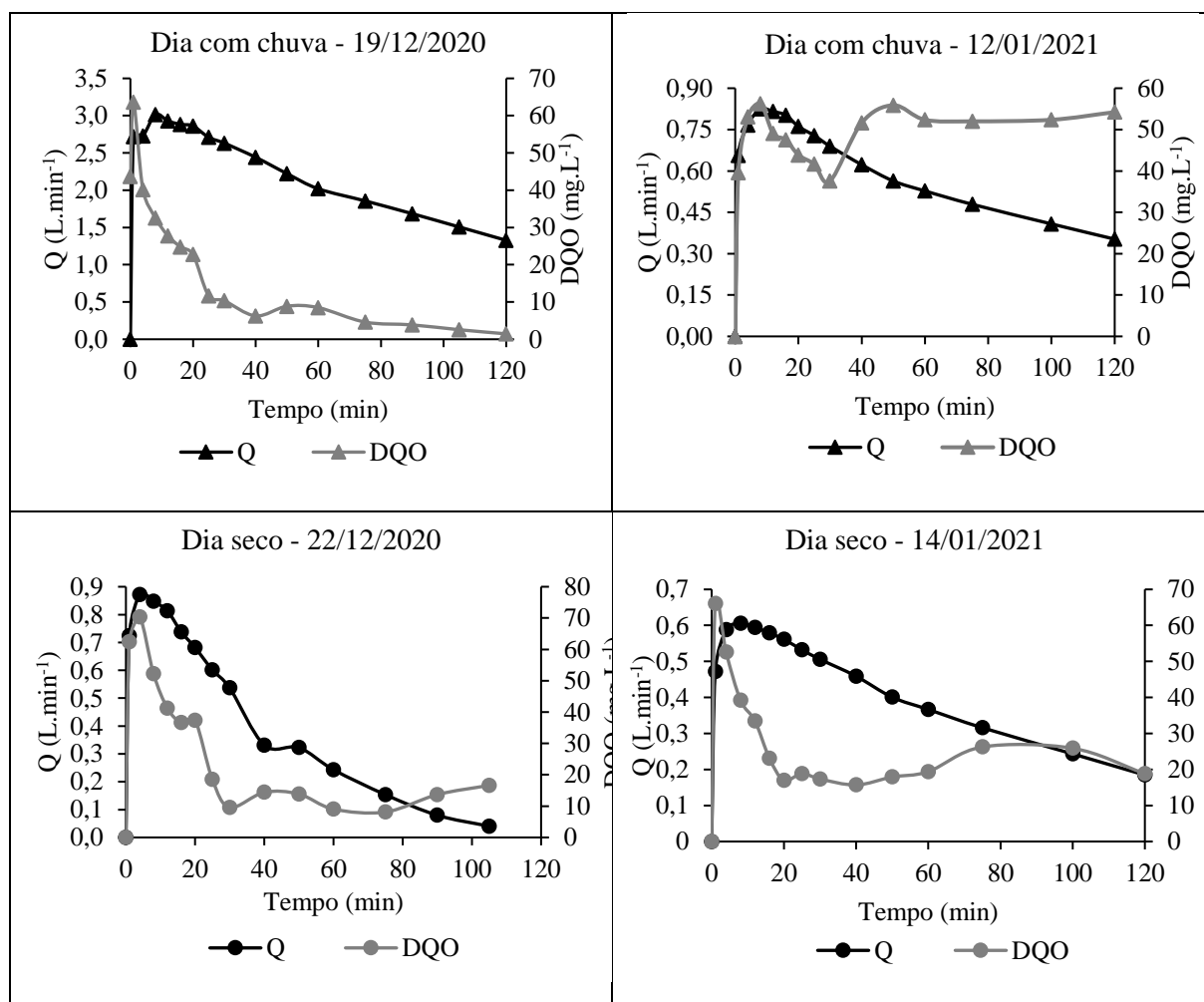
Fonte: Autora.

Em dias secos observou-se uma maior variabilidade de DQO afluente ao WCV-FS. Nesse caso, apenas no período do estudo de 54 dias a 101 dias foi observado similaridades nas concentrações de DQO afluentes ao WCV-FS (Figura 53b). A instabilidade da concentração de entrada permaneceu na concentração efluente ao WCV-FS, o que pode estar relacionado com diferentes tempos de repouso para realização do teste e também, com a carga de aplicação, a qual variou de acordo com o volume aplicado em cada pulso.

Os resultados do monitoramento da DQO e da vazão efluente do WCV-FS num período de 102 dias são apresentados nas Figuras 54 e 55. O tempo inicial ($t=0$) foi o momento final de aplicação de uma batelada.

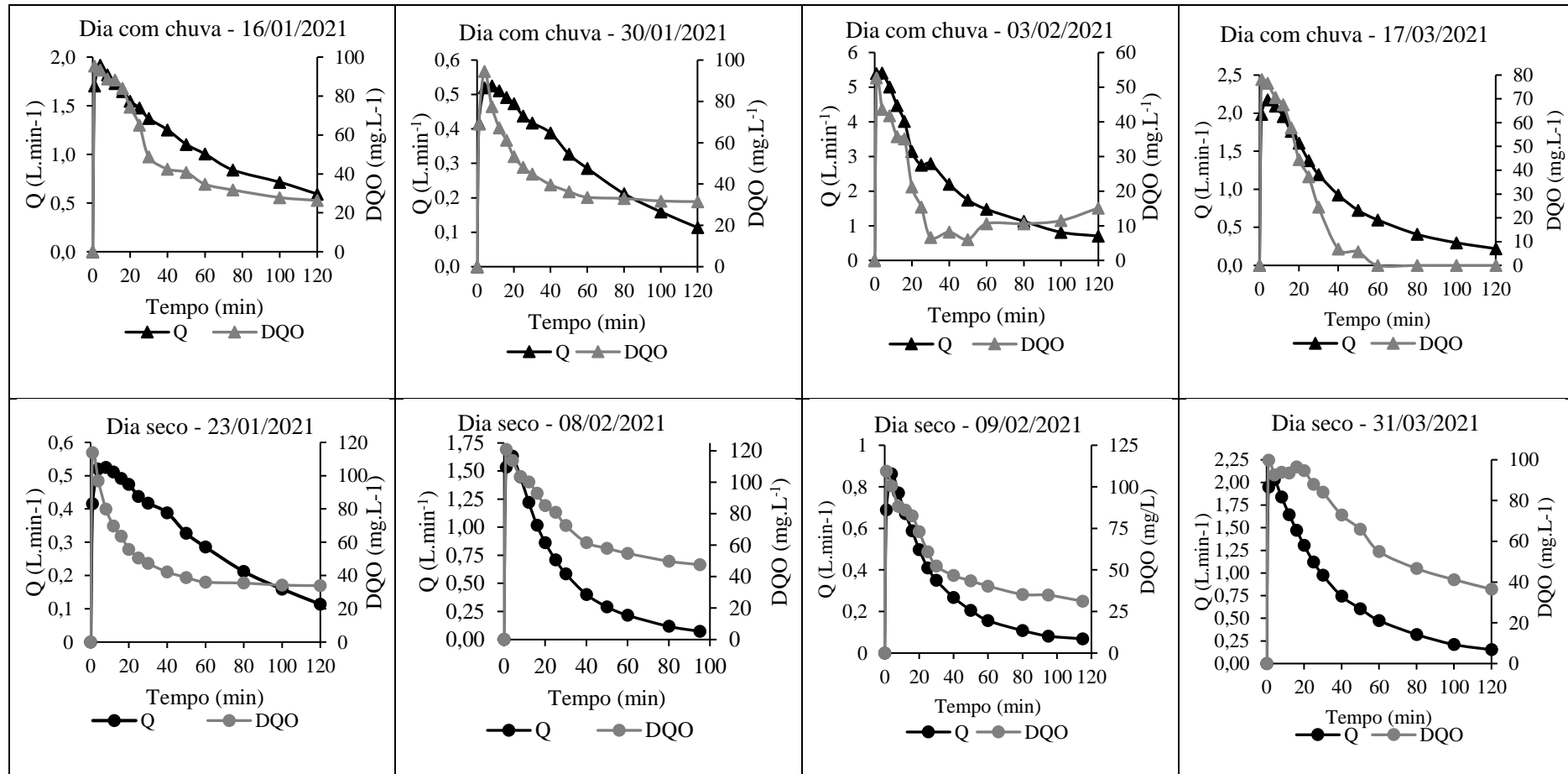
Em sua maioria, os picos de vazão na saída do WCV-FS ocorreram cerca de quatro a oito minutos após o fim de aplicação de um pulso. Nos dias secos, predominantemente, o pico foi no quarto minuto de monitoramento. A incidência de precipitação e seu volume, influenciaram no pico de vazão e na concentração de DQO.

Figura 54 - Comportamento da DQO e da vazão efluente do WCV-FS após aplicação de um pulso em dias de chuva e dias secos para o C1



Fonte: Autora.

Figura 55 - Comportamento da DQO e da vazão efluente do WCV-FS após aplicação de um pulso em dias de chuva e dias secos para o C2



Fonte: Autora.

Em dias de chuva, a vazão máxima registrada foi de 5,40 L.min⁻¹ (teste do dia 03/02/2021), para uma coleta posterior a 41,5 mm (equivalente a 1016,75 L.m⁻² do WCV-FS), ocorrendo um pico com a menor concentração de DQO (52,70 mg.L⁻¹), comparado aos demais, observados em dias de chuva e com dia seco (teste do dia 09/02/2021) correspondente.

Para os dias secos, a vazão máxima observada foi de 2,03 L.min⁻¹ (teste do dia 31/03/2021). Neste mesmo teste, nota-se uma vazão de pico semelhante ao teste correspondente ao dia com chuva, com 2,09 L.min⁻¹ (teste do dia 17/03/2021). Na sequência da ocorrência da vazão de pico, verifica-se um declínio da vazão na saída do WCV-FS até a conclusão dos testes, sendo possível observar que, nos testes dos dias 22/12/20, 08/02/2021 e 09/02/2021, o monitoramento foi interrompido nos últimos minutos, devido ao baixo ou inexistente volume na saída.

Assim como o observado para a vazão, nos primeiros minutos de pulso a DQO apresentou um pico de concentração elevada, em seguida um declínio com irregularidades até o término dos testes, exceto ao teste do dia 12/01/2021, o que qual exibiu um aumento da concentração após 30 minutos de teste. Contudo, somente os testes do dia 12/01/2021 (com chuva) e dia 22/12/2020 (seco) que a vazão de pico e a máxima concentração de DQO ocorreram no mesmo minuto. No geral, os picos de DQO na saída do WCV-FS ocorreram em torno de um a oito minutos posterior ao término de aplicação de um pulso.

A maior concentração de DQO encontrada na saída do WCV-FS foi de 121mg.L⁻¹ (teste do dia 08/02/2021) verificada para dia seco. Todos os testes realizados em dias secos, apresentaram maior concentração de matéria orgânica quando comparados aos seus respectivos testes, realizados em dias com chuva, sendo o máximo valor encontrado em dias com chuva de 95 mg.L⁻¹ (teste do dia 16/01/2021).

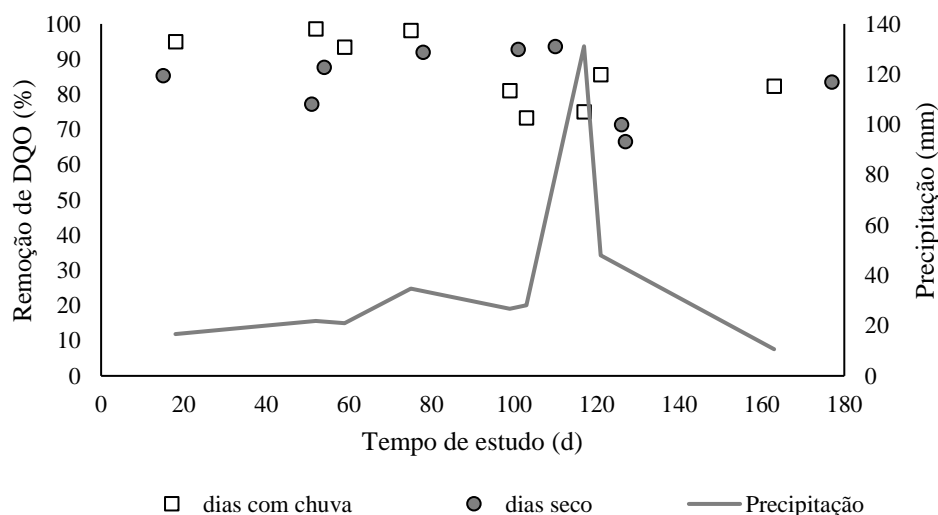
As concentrações de DQO no pico de vazão em dias de chuva e em dias secos foram, em média, 36% e 37% superiores às demais concentrações obtidas ao longo de 120 minutos de percolação, respectivamente. Decezaro (2018) operou um WCVD no mesmo local deste estudo, contudo encontrou picos de DQO 30% superiores às demais concentrações médias.

As eficiências do sistema de WCV-FS foram obtidas em termos de remoção de DQO_t, sendo apresentadas na Figura 56. A eficiência média de 120 min de coleta foi de 87%, após a incidência de precipitação, e de 83%, para os dias secos.

Santos *et al.* (2018), trabalhando com um sistema tanque séptico seguido de um WCV-FS, com carga de DQO de 41 g.m⁻².d⁻¹, obtiveram 91% de eficiência, porcentagem aproximada aos valores obtidos neste trabalho; enquanto Zhang *et al.* (2020), operando um sistema parcialmente saturado em estações secas, sob deficiência de águas residuais, reportaram

eficiência de 73,43% na remoção de DQO. Já Sakurai *et al.* (2021), ao monitorar um UASB seguido de sistema híbrido (WCH + WCV), plantado com *Canna x generalis*, preenchido com cascalho e camada superficial de areia, encontraram remoção de 74% e 79%, da DQO para WCH e WCV, respectivamente. Também em sistema híbrido combinado a um tanque de sedimentação para tratamento de efluente sanitário, os autores Abdel-Shafy, El-Khateeb e Shehata (2017) obtiveram 98,5% de eficiência na remoção de DQO. No geral, para eficiência de remoção em termos de DQO, os WCs com fundo saturado alcançaram eficiências elevadas, uma vez que requerem menor área em comparação aos *wetlands* híbridos.

Figura 56 - Eficiências na remoção de DQO no WCV-FS em dias de chuva e dias seco



Fonte: Autora.

As remoções de DQO_t observadas até os 80 dias de estudo para os dias chuvosos, indicaram resultados semelhantes, quando comparadas às menores eficiências de remoção (posterior aos 80 dias). Esta diminuição na eficiência de remoção pode estar relacionada ao arraste de matéria orgânica até a saída do sistema, em decorrência de intensa precipitação antes ou durante o monitoramento, e ainda, em razão do tempo de espera, após o término da chuva, para realizar a coleta. De fato, nas duas situações em que ocorreram precipitação durante a coleta, as eficiências do sistema foram inferiores aos dias secos. A eficiência observada em dias chuvosos variou de 73,30% a 98,50%.

Barron *et al.* (2020) trabalhando com 35 colunas de biofiltros plantados com sete espécies de plantas, dentre elas a *Canna x generalis*, para tratamento de águas pluviais e águas cinzas, obtiveram remoção de 92% de DQO. Os dias secos apresentaram maior diferença entre os resultados, demonstrando incapacidade de adaptação às variações de concentração de DQO_t, com uma eficiência que variou de 66,50% a 93,50%.

Alguns autores avaliaram o tratamento de água cinza clara em um tanque de evapotranspiração (EvaTAC) seguido de um WCH. Em escala piloto, Caputo *et al.* (2019) obtiveram 88% de eficiência na remoção de DQO, com TAH de 210 mm.d⁻¹ e concentração de 482 mg.L⁻¹ em sistema plantado com *Equisetum giganteum*. Já Magalhães Filho *et al.* (2013), em sistema de bancada de plantado com *Canna spp.*, com TAH de 80 a 110 mm.d⁻¹ e concentração de 771 mg.L⁻¹, conseguiram atingir uma eficiência de remoção de 82% de remoção de DQO. A eficiência obtida por Ramírez (2019) e Silva *et al.* (2017) foi de 77% e 79%, respectivamente, trabalhando em escala real e plantado com *Canna x generalis*.

Desta forma, foi possível observar a importância da evapotranspiração em dias secos para menores valores de remoção de DQO, enquanto que em dias chuvosos resultou em maiores valores de remoção de DQO. Apesar das altas taxas de interceptação da água da chuva nota-se a contribuição da precipitação na diluição do efluente tratado na saída do WCV-FS, com maior vazão de descarga em corpo hídrico e mascarando a eficiência real do tratamento. Por sua vez, os dias secos tem-se uma menor vazão de descarga em corpo receptor e concentrando poluentes no interior do sistema. Para o bom funcionamento destes sistemas de WCs, recomenda-se maior tempo de monitoramento destas variáveis hidrológicas.

6 CONCLUSÃO

Com base no monitoramento do WCV-FS na ETE experimental de tratamento de esgoto doméstico, plantado com *Canna x generalis* e 30 cm de saturação do fundo, pôde-se concluir que:

Em relação ao desenvolvimento da vegetação no WCV-FS:

- A *Canna x generalis* apresentou melhor desenvolvimento no C1, quanto à largura e ao comprimento das folhas, bem como de altura das plantas quando comparado ao C2;
- Embora tenha ocorrido baixa incidência de precipitação durante o C1, o desenvolvimento das plantas foi crescente.
- A elevada quantidade de eventos de precipitação ao longo do C2, não influenciou o crescimento das macrófitas.
- A baixa TAH no C2 influenciou no desenvolvimento da *Canna x generalis*;
- Com a maior TAH no C1, a vegetação atingiu uma área foliar de 5393 cm² e índice de área foliar de 41 m².m⁻². Enquanto a menor TAH no C2, apresentou área foliar máxima de 3075 cm² e índice de área foliar de 21,25 m².m⁻².

Em relação as taxas de evapotranspiração:

- As taxas de evapotranspiração estimadas neste estudo para a *Canna x generalis* do tipo ornamental, são importantes para avaliar suas influências no tratamento efluente em *wetlands* construídos;
- As taxas de evapotranspiração de cultura apresentaram valores muito variáveis e dependentes das condições climáticas, da disponibilidade de efluente na camada saturada e da fase de desenvolvimento da macrófita;
- As maiores taxas de evapotranspiração foram observadas em fase de desenvolvimento avançado da vegetação;
- Ao longo dos períodos secos, os pulsos intermitentes de efluentes e o fundo saturado do WCV-FS influenciaram as altas taxas de evapotranspiração encontradas ao longo do trabalho;
- Após eventos de precipitação, observou-se elevadas taxas de evapotranspiração, devido à disponibilidade de água no meio filtrante, o armazenamento no fundo do WCV-FS e o acúmulo nas folhas da vegetação;

- A evapotranspiração de referência média foi de 3,94 mm.d⁻¹, cerca da metade da evapotranspiração real ou de cultura, de 6,84 mm.d⁻¹.
- Em termos percentuais, 27% da vazão afluyente ao WCV-FS foi perdida para atmosfera na forma de evapotranspiração. Quando comparado ao volume precipitado, este percentual de evapotranspiração real aumenta para 71,5%;
- Considerando a hipótese de que a evaporação do tanque classe A seja a mesma do WCV-FS, a parcela de transpiração da *Canna x generalis* foi de 53% da evapotranspiração e a evaporação correspondeu a 47%.
- O K_c e o K_t apresentaram valores próximos, com uma média de 1,87 e 1,32, respectivamente. Possibilitando a estimativa de evapotranspiração com o auxílio de dados meteorológicos.

Em relação à interceptação da precipitação:

- Os percentuais de interceptação obtidos para a macrófita *Canna x generalis* do tipo ornamental, são importantes para avaliar a capacidade das folhas bloquearem a passagem da chuva, bem como a influência, da precipitação que atravessa a planta, no tratamento de efluente em *wetlands* construídos;
- Os valores de precipitação interna, escoamento pelo tronco e interceptação apresentaram grande variabilidade e foram dependentes do volume precipitado e do estágio de desenvolvimento da *Canna x generalis*;
- Os maiores valores de interceptação foram na fase avançada de desenvolvimento da vegetação;
- A *Canna x generalis* teve elevados percentuais de interceptação total, foram 79,66% de P e 61,56% de P, no C1 e no C2, respectivamente;
- Eventos de baixa incidência de precipitação foram 100% interceptados;
- Os valores de escoamento pelo tronco apresentaram percentuais baixos em relação aos estudos florestais, devido as pequenas dimensões do caule da macrófita e aos erros em sua determinação em decorrência às limitações na metodologia empregada.

Em relação ao tratamento no WCV-FS:

- No C1, o WCV-FS operou com 88% da vazão estimada inicialmente e, no C2, operou com 49% da vazão estimada inicialmente;

- Ao longo dos 120 minutos de teste na saída do WCV-FS, a vazão e a DQO_t apresentaram um pico logo nos primeiros minutos de teste. Em geral, o pico da vazão foi entre quatro e oito minutos e o pico da DQO_t ocorreu entre um a oito minutos após a finalização da batelada;
- Foram determinadas elevadas remoções de matéria orgânica, 86,9% de DQO_t após incidência de chuva e 83,3% de DQO_t em dias sem precipitação;
- A precipitação que atravessa a vegetação é capaz de diluir a matéria orgânica, conforme as menores concentrações de DQO_t encontradas na saída do WCV-FS em dias de chuva;
- Em dias secos, foram obtidas maiores concentrações de DQO_t na saída do WCV-FS devido a evapotranspiração;
- Alguns eventos de chuva durante o monitoramento ocasionaram o arraste de matéria orgânica até a saída do sistema, promovendo o aumento da concentração de DQO_t após alguns minutos de teste.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H. I.; EL-KHATEEB, M. A.; SHEHATA, M. Blackwater treatment via combination of sedimentation tank and hybrid wetlands for unrestricted reuse in Egypt. **Desalination and Water Treatment**, 71 (2017) 145–151.
- AKSORN, E.; VISOOTTIVISETH, E. Selection of suitable emergent plants for removal of arsenic from arsenic contaminated water. **Science Asia** 105-113, 2004.
- ALBUQUERQUE, A.; RANDERSON, P.; BIAŁOWIEC, A. The influence of evapotranspiration on wastewater constructed wetland treatment efficiency *Advances in environmental research*, vol 30, 2013.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998.
- ALMEIDA, R. A.; UCKER, F. E. Considerando a evapotranspiração no cálculo de eficiência de estações de tratamento de esgoto com plantas. **Engenharia Ambiental**. v. 8, n. 4. Espírito Santo do Pinhal, 2011.
- ALONSO, A. A.; MORAES-DALLAQUA, M. A. Morfoanatomia do sistema caulinar de *Canna edulis* Kerr-Gawler (Cannaceae). **Revista Brasileira de Botânica**, v.27, n.2, p.229-239, abr.-jun. 2004.
- ALVES, D. A. **Avaliação do ciclo de vida - ACV de um sistema de *wetland* construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico**. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- ANDA, A. et al. Extending Class A pan evaporation for a shallow lake to simulate the impact of littoral sediment and submerged macrophytes: a case study for Keszthely Bay (Lake Balaton, Hungary). **Agricultural and Forest Meteorology**, volumes 250–251, 15 March 2018, Pages 277-289.
- APHA – AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 2012.
- ARAÚJO, R. K. **Redução de micropoluentes em sistema de tanque séptico e *wetland* construído de fluxo vertical**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.
- BAPTESTINI, G. C. F. et al. Hydraulic conductivity variability in horizontal subsurface flow constructed wetlands. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.37, n.2, p.333-342, 2017.
- BAUMHARDT et al., **Intensidade da amostragem de interceptômetros em microbacia florestada para validação de dados de interceptação**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande, MS. Anais, Campo Grande: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.

BEBEE, D. A. et al. Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modelling. **Ecological Engineering**, v. 71, 2014.

BEZERRA, J. R. C. **Cálculo da evapotranspiração de referência a partir dos dados meteorológicos da estação automática do INMET**. Disponível em: <https://www.cnpa.embrapa.br/destaques/2010/planilha_calculo_eto.html>. Embrapa Algodão. Campina Grande, 2010.

BIAŁOWIEC, A.; ZIELIŃSKI, M.; DEBOWSKI, M. Operational problems in wastewater treatment constructed wetlands The Scientific Papers of the Institute of Environmental Protection of Wrocław University of Technology 82, Series: **Research and Materials**, vol. 22, pp. 26-39, 2006.

BIAŁOWIEC, A.; WOJNOWSKA-BARYLA, I. The efficiency of landfill leachate evapotranspiration in soil-plant system with reed *Phragmites australis* **Ecohydrology & Hydrobiology**, 7 (3–4), pp. 331-337, 2007.

BIAŁOWIEC, A.; WOJNOWSKA-BARYLA, I.; HASSO-AGOPSOWICZ, M. The controlling of landfill leachate evapotranspiration from soil-plant systems with wil-low: *Salix amygdalina* L. **Waste Management Res.** 25 (1), 61–67, 2007.

BIAŁOWIEC, A.; JANCZUKOWICZ, W.; RANDERSON, P.F. Nitrogen removal from wastewater in vertical flow constructed wetlands containing LWA/gravel layers and reed vegetation. **Ecological Engineering**, 37 (6), 897–902, 2011.

BIAŁOWIEC, A.; ALBUQUERQUE, A.; RANDERSON, P. F. The influence of evapotranspiration on vertical flow subsurface constructed wetland performance. **Ecological Engineering**, v. 67, 2014.

BOCHET, E.; RUBIO, J. L.; POESEN, J. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain) **Geomorphology**, volume 23 (2-4), pp. 139-150, 1998.

BOIS et al. Plant transpiration in constructed treatment wetland: Effects on water budget and management consequences. **Journal of Environmental Management**. Volume 295, 2021.

BOONSANER, M.; BORRIRUKWISITSAK, S.; BOONSANER, A. Phytoremediation of BTEX contaminated soil by *Canna x generalis* **Ecotoxicology and Environmental Safety** Volume 74, Issue 6, Pages 1700-1707, 2011.

BORIN, M. et al. Evaluation of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Evapotranspiration in northern and southern Italy. **Ecological Engineering**, 37 (5), pp. 721-728, 2011.

BRAGA, B. et al. **Introdução à Engenharia Ambiental** – 2ª edição São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRAGA, S. M. et al. Desenvolvimento de um sistema automático de baixo custo para medição indireta da interceptação. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos**. 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Cartilha Wetlands construídos aplicados no tratamento de esgoto sanitário: recomendações para implantação e boas práticas de operação e manutenção**. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 56p. 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico - PLANSAB**. Brasília: Governo Federal, 2013. 173 p.

BRASIL, M. S. et al. Modeling of pollution removal in constructed wetlands with horizontal subsurface flow. **Agrartechnische Forschung**, v.13, n.2, p.48-56, 2007.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia sanitária e ambiental**, vol.13, p. 323 – 328, nº 3, 2008.

BRIX, H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? **Water Science Technology** 35 (5), 11–17, 1997.

BRUTSAERT, W. **Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications** D. Reidel Publishing Company, Boston, MA (1982).

CARBALLEIRA, T.; RUIZ, I.; SOTO, M. Effect of plants and surface loading rate on the treatment efficiency of shallow subsurface constructed wetlands. **Ecological Engineering**, v. 90, 2016.

CALHEIROS, C.S.C.; RANGEL, A.O.S.S.; CASTRO, P.M.L. Constructed wetland systems vegetated with different plants applied to the treatment of tannery wastewater. **Water Research** 41 (2007) 1790– 1798.

CAPUTO et al. Effects of graywater on the growth and survival of ornamental plants in nature-based systems. **Journal of Environmental Science and Health**. 1–12, 2019.

CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. **Ciclo hidrológico**. 2006. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/jorge/downloads/APOSTILA/LICA%20Parte%201.pdf>>. Acesso em 15 dez 2019.

CARVALHO, L. G. et al. **Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa**. Pesquisa Agropecuária Tropical, vol. 41, núm. 3, 2011, pp. 456-465 Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos Goiânia, Brasil.

CASTRO, A. S. **Uso de pavimentos permeáveis e coberturas verdes no controle quantitativo do escoamento superficial urbano**. 2011. 161 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2011.

COLLISCHONN, W.; TASSI, R. **Introduzindo Hidrologia**. IPH/UFRGS, 2011.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological processes**, v. 14, n. 16-17, p. 2903-2920, 2000.

CUARTAS, L.A. Interception water-partitioning dynamics for a pristine rainforest in Central Amazonia: Marked differences between normal and dry years. **Agricultural and Forest Meteorology**, 145, 69–83, 2007.

DECEZARO, S. T. et al. Vertical flow constructed *wetland* planted with *Heliconia psittacorum* used as decentralized post-treatment of anaerobic effluent in Southern Brazil. **Journal of Environmental Science and Health: part A**, [s. l.], v. 53, n. 13, p. 1131-1138, 2018.

DECEZARO, S.T. **Nitrificação e remoção de matéria orgânica carbonácea e sólidos de efluente doméstico em *wetland* construído de fluxo vertical**. 2016. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

DE PAOLI, A. C. **Análise de desempenho e comportamento de *wetlands* horizontais de fluxo subsuperficial baseado em modelos hidráulicos e cinéticos**. Dissertação de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

DINIZ, A. R. et al. Precipitação e aporte de nutrientes em diferentes estádios Sucessionais de floresta atlântica, Pinheiral – RJ. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 389-399, 2013.

DODDS, W.; WHILES, M. **Freshwater Ecology: Concepts and Environmental Applications of Limnology**. 3 Ed. 998p. ISBN: 9780128132555, 2020.

DOTRO, et al. Biological wastewater treatment series: Treatment Wetlands. Londres: IWA Publishing, v. 7, 2017.

FACCENDA, H. B. **Evapotranspiração em sistema de tratamento de esgoto tipo *wetland* construído de fluxo vertical**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

FAN, J. et al. Measuring and modeling rainfall interception losses by a native *Banksia* woodland and an exotic pine plantation in subtropical coastal Australia. **Journal of Hydrology**, pp. 156-165, 2014.

FRÉDETTE, C. et al. (2019). Evapotranspiration of a willow cultivar (*Salix miyabeana* SX67) grown in a full-scale treatment *wetland*. **Ecological Engineering**, 127, 254–262.

FREITAS, M. **Avaliação do *start up* de *wetland* construído vertical descendente com fundo saturado empregado no tratamento de esgoto sanitário**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2015.

FREITAS, J.C. **Calibração do modelo AquaCrop e necessidades hídricas da cultura do tomateiro cultivada em condições tropicais**. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

GALDOS, F.V. Estimated distributed rainfall interception using a simple conceptual model and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). **Journal Hydrology**, 468–469, 213–228, 2012.

GALLINA et al. **Evapotranspiração através do sistema *wetland* construído: Estudo de caso na Vinícola Gheller de Guaporé – RS**. In: Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente 2012.

GARDON, F. R. et al. Rainfall interception and plant community in young forest restorations. **Ecological Indicators** 109, 2020.

GERMER, S.; WERTHER, L.; ELSENBEEER, H. Have we underestimated stemflow? Lessons from an open tropical rainforest. **Journal Hydrology**, v. 395, n. 3-4, p. 169-179, Dec. 2010.

GIGLIO, J. N.; MOTA, A. A.; KOBIYAMA, M. Sistema de baixo custo para monitoramento de interceptação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICO, 22., 2017, FLORIANÓPOLIS. **Anais**. Florianópolis/SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2019.

GOERCK, J. **Eletrocoagulação como pós-tratamento do efluente de um tanque séptico e de um *wetland* construído de fluxo vertical**. 2018. Dissertação (Mestrado em programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2018.

GRANATA, F.; GARGANO, R.; MARINIS, G Artificial intelligence-based approaches to evaluate actual evapotranspiration in wetlands. **Science of The Total Environment**. Volume 703, 2020.

GREENWAY, M. The role of constructed wetlands in secondary effluent treatment and water reuse in subtropical an arid Australia. **Ecological Engineering**, v. 25, 2005.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Estimating potential evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 108, p. 225-230, 1982.

HEADLEY, T. R. et al. Evapotranspiration from subsurface horizontal flow *wetlands* planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. **Water research**, v. 46, 2012.

HOFFMANN, H. et al. 2011 Technology review of constructed *wetlands* subsurface flow constructed *wetlands* for greywater and domestic wastewater treatment. Eschborn: Giz, 36p. 2011.

HOLWERDA, F.; SCATENA, F.N.; BRUIJNZEEL, L.A. Throughfall in a Puerto Rican lower montane rainforest: A comparison of sampling strategies. **Journal of Hydrology**, 327, 592–602, 2006.

HULVEY, K. B.; THOMAS, K.; THACKER, E. A Comparison of Two Herbaceous Cover Sampling Methods to Assess Ecosystem Services in High-Shrub Rangelands: Photography-Based Grid Point Intercept (GPI) Versus Quadrat Sampling. **Rangelands**, vol. 40, Issue 5, Pages 152-159, 2018.

ILKAEI, M.N. et al. Prediction Model of Leaf Area in Soybean (*Glycine max* L.). **American Journal of Agricultural and Biological Sciences**, v. 6, n. 1, p. 110- 113, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Dados de estações automáticas**. (Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>). Acesso em dezembro de 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais climatológicas do Brasil 1961-1990**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesautomaticas>>. Acesso em janeiro de 2019.

IWA Áreas úmidas construídas para controle de poluição. Relatório Científico e Técnico No. 8. **IWA Publishing, London, UK**, 156 pp., 2000.

KADLEC, R.H. **Hydrologic factors in wetland water treatment**. In: Hammer, D.A. (Ed.), *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment e Municipal, Industrial and Agricultural*, (3rd Print). Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 21 e 40, 1989.

KADLEC, R.H.; KNIGHT, R.L. **Treatment Wetlands**, first ed. CRC Press, Boca Raton. 1996.

KADLEC, R.H.; WALLACE, S.D. **Treatment Wetlands** (second ed.), Boca Raton, FL, 2009.

KIM, B; GAUTIER, M.; PROST-BOUCLE, S.; MOLLE, P; PHILIPPE MICHEL, et al. Performance evaluation of partially saturated vertical-flow constructed wetland with trickling filter and chemical precipitation for domestic and winery wastewaters treatment. **Ecological Engineering**, Elsevier, 2014, 71, pp.41-47. [ff10.1016/j.ecoleng.2014.07.045](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.045)ff. fhal-01078368f.

KOBIYAMA, M.; MOTA, A. A.; CORSEUIL; C. W. **Recursos hídricos e saneamento**. Curitiba: Ed. Organic Trading, 1 ed., 160p., 2008.

KONNERUP D.; KOOTTATEP T.; BRIX H. Treatment of domestic wastewater in tropical, subsurface flow constructed wetlands planted with Canna and Heliconia. **Ecological Engineering**, v. 35, p. 248-257, 2009.

KUMAR, R.; JAT, M. K.; SHANKAR, V. Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration – a review. **Water Science & Technology** Vol. 66, 2012.

LEMOS, H. G. **Modelagem de sistemas de wetlands construídos como medidas de controle de poluição difusa na bacia hidrográfica do córrego do Mineirinho**, São Carlos – SP. 2016 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

LIBÂNO, P. A.; CHERNICHARO, C. A.; NASCIMENTO, N. O. A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública. **Engenharia sanitária e ambiental**, v. 10, 2005.

LIM, W.H. et al. O balanço energético de uma panela de evaporação classe A dos EUA **Agric. Meteorol Florestal**, 182-183 (2013), pp. 314 – 331.

LOPES, J. O. et al. Produtividade de plantas ornamentais e da gramínea *tifton 85* em *wetlands* construídos como unidade de tratamento e aproveitamento de esgoto sanitário. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 4., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C. et al. Hydraulic and hydrological aspects of an evapotranspiration-constructed wetland combined system for household greywater treatment. **Journal of Environmental Science and Health: part A**, [s. l.], v. 53, n. 6, p. 493-500, 2018.

MALAGI, G. et al. Método não destrutivo para determinação da área foliar da videira, cultivar BRS-Violeta. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 32, n. 4, p. 1250-1254, 2010.

MANNARINO, C. F. et al. 2006 *Wetlands* para tratamento de lixiviados de aterros sanitários – experiências no aterro sanitário de Piraí e no aterro metropolitano de Gramacho (RJ). **Engenharia sanitária e ambiental**, Vol.11 - Nº 2 - abr/jun 2006, 108-112.

MARTIN, B. K. The dynamic stormwater response of a green roof. 2008. 159 p. Dissertação (Mestrado em Paisagem Arquitetônica) – Universidade de Guelph, Canadá, 2008.

MATOS, M. P. et al. Uso de traçador salino para avaliação da colmatação e das condições hidrodinâmicas em sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, v.35, p. 1137 – 1148, nº6, Jaboticabal, 2015.

MAZUCATO, V. S. H. Behavior of partially saturated vertical flow constructed wetland in the removal of nitrogenated organic matter and phosphorus. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 8, p. 56506-56520 aug. 2020.

MITSCH, W.J.; GOSSELINK, J.G., 2007. **Wetlands**, fourth ed. John Wiley & Sons Inc., New York.

MONTALVÃO, M. L. et al. Produtividade de espécie ornamental e gramíneas em *wetlands* no semiárido mineiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 4., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

MORAIS, C. J. et al. Avaliação do desempenho de um *wetland* construído tratando esgotos sanitários sintéticos **2º Simpósio Brasileiro sobre Wetlands Construídos**, UTFPR, 2015.

MUZYLO, A. A review of rainfall interception modelling. **Journal Hydrology**, 370, 191–206, 2009.

NHAMBIRRE, C. A. **Caracterização da remoção de nutrientes de um sistema de tratamento de esgoto sanitário empregado para pequena comunidade, composto por reator anaeróbio compartimentado seguido de wetland construído de fluxo vertical**. 2016. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2016.

O'HOGAIN, S. et al. **A review of zero discharge treatment systems using reed willow bed combinations in Ireland**. 12th IWA International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control. Venice, 2010.

OLIVEIRA, L. L. et al. Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuanã, na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 4, p. 723-732, 2008.

ONDOY; J.L. et al. Morphological and cytogenetic characterization of four CANNA (*Canna x generalis* l. h. bailey & e. z. Bailey) cultivars and two putative F1 hybrids. **The Philippine Agricultural Scientist** Vol. 103 No. 3 (September 2020).

ORMONDE, V. S. S. **Avaliação de “wetlands” construídos no pós-tratamento de efluente de lagoa de maturação**. 2012. 96 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2012.

PASSEPORT, E. et al. Pesticide contamination interception strategy and removal efficiency in forest buffer and artificial wetland in a tile-drained agricultural watershed **Chemosphere**, volume 91, Issue 9, Pages 1289-1296, 2013.

PEDESCOLL, A. et al. Evapotranspiration affecting redox conditions in horizontal constructed wetlands under Mediterranean climate: Influence of plant species. **Ecological Engineering**, v. 58, 2013.

PEIXOTO, C.P.; CRUZ, T.V.; PEIXOTO, M.F.S.P. Análise quantitativa do crescimento de plantas: conceitos e Prática. **Enciclopédia Biosfera**, v. 7, n. 13, p. 51-76, 2011.

PELLISSARI, C. **Tratamento de efluente proveniente da bovinocultura de leite empregando wetlands construídos de escoamento subsuperficial**. 2013. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

PENMAN, H. L. **Vegetation and Hydrology**. 1st ed., England: C.A.B (Commonwealth Agricultural Bureaus), 124p., 1963.

PEREIRA, P. R. B. et al. Contribuição a Geografia Física do Município de Santa Maria: Unidades de Paisagem. In: **Geografia: Ensino & Pesquisa**. Santa Maria, (3):37-68, 1989.

PERONDI, T. **Custo-benefício de um wetland construído de fluxo vertical para o tratamento de esgoto doméstico**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SANTA MARIA – RS. **Plano Municipal de Saneamento Ambiental**. v. 1. 2015.

QUELUZ, J. G. T.; PEREIRA, F. F. S.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Evapotranspiration and crop coefficient for *Typha latifolia* in constructed wetlands. **Water Quality Research Journal**, 2018.

RAISIN, G.; BARTLEY, J.; CROOME, R. Groundwater influence on the water balance and nutrient budget of a small natural wetland in Northeastern Victoria, Australia. **Ecological Engineering**, 12, 133-147, 1999.

RAMÍREZ, R. J. M. G et al. Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em sistema de tanque séptico seguido de *wetland* construído de fluxo vertical com recirculação. In: SIMPÓSIO

BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 4., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

RAMÍREZ, R. J. M. G. **Remoção de matéria orgânica e nutrientes em sistema de tanque séptico seguido de *Wetland* construído de fluxo vertical com recirculação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2019.

RAMÍREZ, R. J. M. G. **Assimilação de nutrientes de esgoto doméstico por *Canna x generalis* e *Canna indica* em wetland construído de fluxo vertical**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, 2017.

RODRIGUES et al. **Interceptação da precipitação pelas copas em *Pinus halepensis* Mill - Albacete – Espanha**. *Irriga, Botucatu*, v. 21, n. 4, p. 736-749, outubro-dezembro, 2016.

ROUSSO, B. Z. **Avaliação de um sistema híbrido de wetlands construídos empregados no tratamento de esgoto sanitário**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

SAEED, T.; SUN, G. A comprehensive review on nutrients and organics removal from different wastewaters employing subsurface flow constructed wetlands. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 3389, n. April, 2017.

SAKURAI, K. S. I. et al. Hybrid constructed wetlands as post-treatment of blackwater: An assessment of the removal of antibiotics. **Journal of Environmental Management**, 278, 2021.

SANTOS, M. O. et al. Avaliação dos dois primeiros anos de operação de um *wetland* construído vertical de fundo saturado aplicado no tratamento de esgoto sanitário. **TECNO-LÓGICA**, Santa Cruz do Sul, v. 15, n. 2, p. 25-29, jan./jun. 2018.

SARI, V. **Interceptação da chuva em diferentes formações florestais na região de Santa Maria – RS**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

SARI, V.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Interceptação da chuva em diferentes formações florestais na região sul do Brasil **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. RBRH vol. 21 n°1 Porto Alegre jan./mar. 2016 p. 65 – 79.

SANTOS, K.S. **Comportamento hidrodinâmico de um *wetland* construído de fluxo vertical**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental), Universidade Federal de Santa Maria, 2018.

SCHMILDT, E.R. et al. Allometric models for determining leaf area of ‘Fino de Jete’ cherimoya grown in greenhouse and in the open field. **Fruits**, v. 72, n. 1, p. 24-30, 2017.

SCHÜTTE, H.; FEHR, G. Neue Erkenntnisse zum Bau und Betrieb von Pflanzenkläranlagen **Korresp. Abwasser**, 39 (1992), pp. 872-879.

SCHWAMMBERGER, P. F. et al. Nutrient uptake by constructed floating wetland plants during the construction phase of an urban residential development. **Science of the Total Environment** 677 (2019) 390–403.

SERIGHELI, F. et al. Avaliação dos efeitos da evapotranspiração, salinidade e propriedades hidráulicas em um sistema de wetlands construído para o tratamento de águas residuais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 4., 2019, Belo Horizonte. **Anais**. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2019.

SEZERINO, P. H. (Org.); PELISSARI, C. (Org.). *Wetlands* construídos como ecotecnologia para o tratamento de águas residuárias: experiências brasileiras. Recurso eletrônico - organização de Pablo Heleno Sezerino, Catiane Pelissari – 1.ed. - Curitiba: Brazil Publishing, 2021.

SEZERINO, P. H. et al. Experiências brasileiras com *wetlands* construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 20, n. 1, p. 151-158, 2015.

SEZERINO, P. H. et al. *Wetlands* construídos horizontais aplicados no tratamento descentralizado de esgotos. **Engenharia e Construção Civil**, Curitiba - PR, v. 2, n.2, p. 1-10, jul./dez., 2015.

SEZERINO, P. H. **Potencialidade dos filtros plantados com macrófitas (constructed wetlands) no pós-tratamento de lagoas de estabilização sob condições de clima subtropical**. 2006. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2006.

SEZERINO, P.H.; PHILIPPI, L.S. **Tratamento de esgotos utilizando o potencial solo – planta**. BVSDE, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SHARMA, H. B.; SINHA, P. R. Performance analysis of vertical flow constructed wetland to treat domestic wastewater using two different filter media and Canna as a plant. **Indian Journal of Science and Technology**, Vol 9(44), November 2016.

SILVA, J. B. da et al. A modified constructed wetland system for greywater treatment. **Desalination and Water Treatment**, Hopkinton, v. 91, p. 31-39, 2017.

SILVA, S. C. **“Wetlands Construídos” de fluxo vertical com meio suporte de solo natural modificado no tratamento de esgotos domésticos**. 2007. 231 p. Dissertação (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

SILVEIRA et al., 2015 Influence of partial saturation on total nitrogen removal in a single-stage French constructed wetland treating raw domestic wastewater. **Ecological Engineering** Volume 77, April 2015, Pages 257-264.

SILVEIRA, A. L. L. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed., Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2002. p. 243-252.

SIUTA, J. Using plants for sanitation of soil contaminated by waste. **Proceedings of Polish Scientific Conference on Liquid Waste Treatment In Natural Environment Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu**, 293, pp. 57-67, 1996.

SNIS – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgoto** – 2018. Ministério das Cidades, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Brasília: SNSA/MCIDADES, 220 p., 2019. Acesso em dezembro de 2021.

SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; NETTO, A. O. A. Avaliação do coeficiente do Tanque Classe “A” na estimativa da evapotranspiração de referência no baixo São Francisco, SE. Irriga, Botucatu, Edição Especial, **IRRIGA & INOVAGRI**, p. 47-58, 2016.

STANHILL, G. **The CIMO international evaporimeter comparisons**. WMO Report No. 449 WMO, Geneva, Switzerland (1976).

SUNTTI, C.; MAGRI, M.E.; PHILIPPI, L.S. **Treatment and dewatering of septic tank sludge by constructed wetlands in Southern Brazil**. In: 12th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control: Venice, Italy. v.2, p.965-972, 2010.

TANAKA, J. T. et al. Desenvolvimento de macrófitas aquáticas em uma estação de tratamento de esgotos sanitários por leitos cultivados. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE WETLANDS CONSTRUÍDOS, 2., 2015, Curitiba. **Anais**. Curitiba/PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

TCHOBANOGLOUS, G. Aquatic systems for wastewater treatment: engineering considerations K.R. Reede, W.H. Smith (Eds.), Aquatic plants for wastewater treatment and resource recovery, **Magnolia Publishing Inc**, Orlando, Florida (1987).

TREVISAN, G. de M. **Remoção de coliformes e Ascaris lumbricoides em sistema de wetland construído de fluxo vertical**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

TOEBE, M. et al. Modelos para a estimativa da área foliar de feijão de porco por dimensões foliares. **Bragantia**, v. 71, n. 1, p. 37-41, 2012.

TUCCI, C. E. M. Interceptação; Escoamento superficial. In: Tucci, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3 ed., Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2002.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica**. 302 p. Brasília, 2006.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2007.

TUTTOLOMONDO, T. et al. Effect of plant species on water balance in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland planted with *Arundo donax L.* and *Cyperus alternifolius L.* – Two-year tests in a Mediterranean environment in the West of Sicily (Italy). **Ecological Engineering**, v. 74, 2014.

UNITED NATIONS. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: Unic Rio, 2015. 49 p.

USEPA. **Introduction to phytoremediation**, EPA/600/R-99/107, 2000.

VACA, C. C.; VAN DE TOL, C.; GHIMIRE, C. P. The influence of long-term changes in canopy structure on rainfall interception loss: a case study in Speulderbos, the Netherlands **Hydrology and Earth System Sciences**, 22, 3701–3719, 2018.

VON SPERLING, M.; SEZERINO, P.H. (2018). Dimensionamento de *wetlands* construídos no Brasil. **Boletim Wetlands Brasil**, Edição Especial, 65 p. ISSN 2359-0548, 2018.

VYMAZAL, J. Constructed wetlands for wastewater treatment. **Ecological Engineering**, v. 25, p. 475-477, 2005.

VYMAZAL; J. KRÖPFELOVÁ, L Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow. Holanda **Springer Netherlands**, 2008.

VYMAZAL, J. Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. **Water**, v. 2, p. 530-549, 2010. ISSN 2073-4441.

XIAO, Q. et al. Winter rainfall interception by two mature open-grow trees in Davis, California. **Hydrological Processes**, Davis, v. 14, p.763-784, June, 2000.

XU, Q. et al The influence of the outlet position and substrate on the nitrogen purification of vertical flow constructed *wetlands*. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**. 601 012048 2020.

ZHANG, B. et al. Soil capacity of intercepting different rainfalls across subtropical plantation: Distinct effects of plant and soil properties. **Science of The Total Environment**, volume 784, 147120, 2021.

ZHANG, M. et al. Operation strategy for constructed *wetlands* in dry seasons with insufficient influent wastewater. **Bioresource Technology**, volume 317, 2020.

ZHANG, S. et al. Evapotranspiration partitioning using a simple isotope-based model in a semiarid marsh wetland in northeastern China. **Hydrological Processes**, 32(4), 493–506, 2018.

ZHANG, Y. et al. Modeling rainfall interception loss by two xerophytic shrubs in the Loess Plateau. **Hydrological Processes**. 31, 1926–1937, 2017.

ZSILANE-ANDRE, A.; SOMOGYI, A.; HOLB, I. J. Leaf Number and Plant Height of Three *Canna x generalis* Cultivars. **International Journal of Horticultural Science**. 2017, 23, 22–24.

ZUCOLOTO, M.; LIMA, J. S. S.; COELHO, R. I. Modelo matemático para estimativa da área foliar total de bananeira ‘prata-anã’. **Revista Brasileira Fruticultura**, Jaboticabal - SP, v. 30, n. 4, p. 1152-1154, dezembro 2008.

WANG, X. Q. et al. Canopy storage capacity of xerophytic shrubs in Northwestern China. **Journal of Hydrology**, volumes 454-455, pp. 152-159, 2012.

WANG, Z.H. et al. The relationship of plant species diversity to ecosystem function in relation to soil conservation in sem-humid evergreen forests, Yunnan province, China. **Journal of Plant Ecology**, 30 (3), pp. 392-403, 2006.

WARD, A. D.; TRIMBLE, S. W. **Environmental Hydrology**. 2. ed. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 2004.

WIESSNER, A. et al. Treating a lignite pyrolysis wastewater in a constructed subsurface flow wetland **Water Research** 33, 1296–1302, 1999.

WORLD HEALTH ORGANIZATION/UNICEF Joint Monitoring Program for Water Supply, Sanitation and Hygiene (JMP) – Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000 – 2020.

WU, S. et al. Treatment of industrial effluents in constructed wetlands: Challenges, operational strategies and overall performance. **Environmental Pollution**, v. 201, p. 107-120, 2015.

WU, J. et al. Estimating Rainfall Interception of Vegetation Canopy from MODIS Imageries in Southern China. **Remote Sensing**, 11, 2468, 2019.

YAN, C. et al. Seasonal and interannual variability of surface energy fluxes and evapotranspiration over a subalpine horizontal flow wetland in China. **Agricultural and Forest Meteorology**. Volumes 288–289, 15 July 2020.

YAN, T. et al. Effects of the morphological characteristics of plants on rainfall interception and kinetic energy. **Journal of Hydrology**, vol. 592, 2021.

APÊNDICE A – DADOS PARA ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE CULTURA E COEFICIENTE DE TANQUE CLASSE A

Tabela A1. – Taxas de evapotranspiração de referência (05/10/20 – 31/03/21)

Dias	out/20	nov/20	dez/20	jan/21	fev/21	mar/21
1	-	4,45	3,64	4,45	4,27	3,56
2	-	4,71	4,29	4,83	4,30	3,60
3	-	4,71	4,02	4,44	2,52	3,42
4	-	4,02	4,14	4,81	3,39	2,96
5	2,65	4,94	2,70	3,69	3,41	3,17
6	3,42	5,52	2,55	5,24	3,92	3,00
7	3,04	5,77	3,78	4,47	4,43	3,41
8	3,50	5,13	4,16	5,68	4,06	3,70
9	3,85	3,54	4,26	5,71	3,92	3,34
10	3,62	4,45	4,59	5,47	3,79	3,51
11	4,56	3,94	6,12	5,41	3,82	3,50
12	4,17	3,93	3,81	4,57	3,19	3,67
13	4,32	4,21	4,19	3,00	3,94	3,67
14	3,40	4,79	3,76	3,97	3,88	3,79
15	4,07	4,69	4,86	4,69	3,90	3,31
16	4,80	3,13	3,98	3,74	3,67	3,74
17	4,73	3,54	4,09	3,47	3,71	2,86
18	5,51	3,30	4,78	4,15	3,55	2,54
19	5,88	3,68	4,27	3,91	4,15	2,99
20	5,80	3,66	3,62	3,60	4,27	3,78
21	5,49	3,73	4,13	3,29	3,97	3,35
22	5,26	3,79	4,53	4,03	4,25	2,29
23	2,88	4,54	4,44	4,36	3,51	1,79
24	4,13	5,32	4,94	4,42	3,47	2,50
25	4,29	5,44	4,72	4,58	3,86	3,10
26	3,33	2,80	4,05	3,40	3,70	2,45
27	3,82	2,83	4,20	3,07	3,44	2,23
28	5,23	3,56	4,38	3,66	3,36	2,45
29	3,56	4,32	5,08	4,20	-	2,60
30	4,16	3,07	5,50	4,49	-	2,52
31	4,07	-	3,67	3,05	-	2,69
Média	4,21	4,18	4,23	4,25	3,77	3,08
Desvio padrão	0,89	0,81	0,70	0,76	0,41	0,55
Máximo	5,88	5,77	6,12	5,71	4,43	3,79
Mínimo	2,65	2,80	2,55	3,00	2,52	1,79

(-) Não detectado/ não determinado

Tabela A2. – Evapotranspiração de cultura da *Canna x generalis* (05/12/20 – 31/03/21)

Nº de dias	dez/20	jan/21	fev/21	mar/21
1	4,69	4,2	3,11	9,93
2	16,00	12,2	3,15	4,29
3	11,62	8,9	15,06	4,28
4	17,91	2,8	6,27	4,28
5	7,42	0,4	13,39	5,05
6	8,80	0,5	5,89	2,62
7	5,42	8,3	5,87	4,17
8	0,88	14,7	10,03	2,49
9	4,33	14,7	2,90	6,10
10	3,84	14,7	2,50	4,72
11	10,68	14,7	-	3,48
12	5,51	4,6	-	0,77
13	7,82	-	-	4,10
14	7,61	-	-	6,82
15	6,52	-	-	5,60
16	7,66	-	-	-
17	11,14	-	-	-
Média	8,11	8,38	6,82	4,58
Desvio padrão	4,3	5,8	4,5	2,1
Máximo	17,91	14,71	15,06	9,93
Mínimo	0,88	0,40	2,50	0,77

(-) Não detectado/ não determinado

Tabela A3. – Valores obtidos de coeficiente de cultura e coeficiente de tanque classe A (02/12/20 – 31/03/21)

Data	ETR	E	Kc	Kt
02/12/2020	4,69	5,00	0,97	0,94
03/12/2020	16,00	4,00	3,61	4,00
04/12/2020	11,62	7,00	2,42	1,66
05/12/2020	17,91	6,00	4,86	2,99
10/12/2020	7,42	10,00	1,36	0,74
11/12/2020	8,80	7,00	1,63	1,26
13/12/2020	5,42	2,80	1,81	1,93
14/12/2020	0,88	5,00	0,22	0,18
15/12/2020	4,33	4,00	0,92	1,08
17/12/2020	3,84	7,00	1,11	0,55
18/12/2020	10,68	6,00	2,58	1,78
19/12/2020	5,51	4,70	1,41	1,17
20/12/2020	7,82	3,00	2,17	2,61
21/12/2020	7,61	6,00	2,32	1,27
24/12/2020	6,52	9,00	1,47	0,72
29/12/2020	7,66	7,00	1,82	1,09
30/12/2020	11,14	6,00	2,48	1,86
13/01/2021	4,21	2,00	1,40	2,11
14/01/2021	12,17	11,00	3,07	1,11
16/01/2021	8,93	3,10	2,39	2,88
20/01/2021	2,77	5,00	0,77	0,55
21/01/2021	0,40	8,00	0,12	0,05
22/01/2021	0,46	5,00	0,11	0,09
25/01/2021	8,28	1,00	1,81	0,00
27/01/2021	14,71	0,00	4,78	0,00
28/01/2021	14,70	0,00	4,02	0,00
29/01/2021	14,70	0,00	3,50	0,00
30/01/2021	14,70	0,90	3,27	0,00
31/01/2021	4,57	3,30	1,50	1,38
01/02/2021	3,11	3,00	0,73	1,04
05/02/2021	3,15	5,00	0,92	0,63
06/02/2021	15,06	2,00	3,84	0,00
09/02/2021	6,27	6,00	1,60	1,04
10/02/2021	13,39	3,00	3,53	4,46
11/02/2021	5,89	4,70	1,54	1,25
12/02/2021	5,87	2,50	1,84	2,35
23/02/2021	10,03	6,00	2,86	1,67
24/02/2021	2,90	-	0,84	-
25/02/2021	2,50	8,00	0,65	0,31
03/03/2021	9,93	2,90	2,90	2,48
04/03/2021	4,29	1,45	1,45	3,90
05/03/2021	4,28	1,35	1,35	3,57
06/03/2021	4,28	1,42	1,42	0,79
13/03/2021	5,05	1,37	1,37	1,26
14/03/2021	2,62	0,69	0,69	0,65
15/03/2021	4,17	1,26	1,26	0,52
16/03/2021	2,49	0,67	0,67	0,50
18/03/2021	6,10	2,41	2,41	1,53
19/03/2021	4,72	1,58	1,58	1,57
20/03/2021	3,48	0,92	0,92	0,50
25/03/2021	0,77	0,25	0,25	0,19
28/03/2021	4,10	1,67	1,67	-
29/03/2021	6,82	2,62	2,62	1,70
30/03/2021	5,60	2,22	2,22	2,80
Média	7,79	3,13	1,87	1,32
Desvio padrão	4,44	2,73	1,14	1,13
Máximo	17,91	11,0	4,86	4,46
Mínimo	0,4	0,25	0,11	0,05

(-) Não detectado/ não determinado

APÊNDICE B – DADOS MONITORADOS PARA ESTIMATIVA DA INTERCEPTAÇÃO

Tabela B1. – Monitoramento da precipitação incidente, precipitação interna, escoamento pelo tronco, estimativa da interceptação na *C. x generalis* (05/10/20 – 31/03/21). Altura, área foliar e índice da área foliar correspondente a cada monitoramento de interceptação

Ciclo	Tempo (d)	Data	P (mm)	Pi (mm)	Et (mm)	I (mm)	I %	Altura planta (cm)	AF (cm ²)	IAF (m ² m ⁻²)
C1	0	05/10/2020	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	27/10/2020	29,4	13,91	0,08	15,41	52	61,5	2336,5	17,8
	2	18/11/2020	8,7	1,53	0,60	7,17	82	140,3	3957,4	30,1
	1	26/11/2020	21,9	2,53	0,51	18,86	86	140,3	3957,4	30,1
	2	29/11/2020	30,3	5,03	0,60	24,67	81	155,5	4597,4	35,0
	1	03/12/2020	21	3,23	0,36	17,41	83	155,5	4597,4	35,0
	1	12/12/2020	1,8	0	0	1,80	100	171,1	4675,7	35,6
	1	13/12/2020	1,8	0	0	1,80	100	171,1	4675,7	35,6
	1	19/12/2020	34,7	4,50	0,58	29,61	85	177,5	4518,4	34,4
	1	05/01/2021	3,7	0	0	3,70	100	191,6	5393,1	41,1
	1	12/01/2021	26,7	3,37	0,35	22,97	86	191,6	5393,1	41,1
Média			18,0	3,4	0,3	14,3	85,7	155,6	4410,2	33,6
Desvio padrão			12,8	4,1	0,3	10,1	14,0	37,8	873,4	6,6
Máximo			34,7	13,9	0,6	29,6	100	191,6	5393,1	41,1
Mínimo			1,8	0	0	1,8	52,41001	61,5	2336,5	17,8
C2	1	16/01/2021	28,1	28,1	0	0	0	30	0	0
	3	30/01/2021	131,1	69,07	3,42	58,61	45	76,1	1390,8	10,9
	2	04/02/2021	47,9	19,89	2,80	25,21	53	76,1	1390,8	10,9
	2	12/02/2021	29	8,12	0,94	19,94	69	94,9	2158,9	16,9
	1	23/02/2021	3	0	0	3,00	100	121,3	2710,0	21,2
	3	06/03/2021	10,7	1,003	0,24	9,46	88	121,3	2710,0	21,2
	1	17/03/2021	10,6	1,019	0,147	9,43	89	127,6	2604,7	16,3
	1	21/03/2021	39,9	5,013	0,74	34,15	86	127,6	2604,7	16,3
	1	25/03/2021	23	3,852	0,39	18,75	82	142,2	3075,4	19,3
	1	27/03/2021	15,6	2,419	0,41	12,77	82	142,2	3075,4	19,3
Média			34,5	12,3	1,0	21,3	76,9	114,3	2413,4	16,9
Desvio padrão			39,0	22,2	1,2	16,8	18,1	25,7	640,5	3,9
Máximo			131,1	69,1	3,4	58,6	100	142,2	3075,4	21,2
Mínimo			3	0	0	3	44,7	76,1	1390,8	10,9

APÊNDICE C – MONITORAMENTO DA VEGETAÇÃO

Tabela C.1 – Medição de altura, largura, comprimento e número de folhas da *Canna x generalis* ao longo do tempo (out/20 – mar/21)

Data	Altura da planta (cm)	L (cm)	C (cm)	Nº de folhas	AF (cm ²)	IAF (m ² m ⁻²)
Corte - 05/10/2020	30	0	0	0	0	0,0
25/10/2020	61,5	19,3	40,12	3	2336,50	17,8
10/11/2020	118,3	18,4	41,65	4	3162,68	24,1
20/11/2020	140,3	19,6	43,98	5	3957,44	30,1
01/12/2020	155,5	19,2	41,52	6	4597,41	35,0
12/12/2020	171,1	18,4	40,16	6	4675,65	35,6
23/12/2020	177,5	18,7	40,41	6	4518,38	34,4
10/01/2021	191,6	18,8	40,67	6	5393,13	41,1
Média C1	130,72	18,90	41,22	5	4091,60	31,1
Desvio C1	57,7	0,5	1,4	1,1	1035,6	7,9
Máximo C1	191,6	19,6	44,0	6,0	5393,1	41,1
Mínimo C1	30	18,41	40,13	3,00	2336,50	17,79
Corte - 15/01/2021	30	0	0	0	0	0,0
30/01/2021	76,1	13,4	31,4	3	1390,83	10,9
15/02/2021	94,9	14,8	36,3	4	2158,89	16,9
03/03/2021	121,3	16,2	39,4	4	2710,03	21,2
19/03/2021	127,6	17,1	41,5	4	2604,69	16,3
31/03/2021	142,2	19,0	46,3	4	3075,38	19,3
Média C2	98,67	16,11	38,99	4	2387,96	16,94
Desvio C2	41,2	2,1	5,6	0,5	646,1	3,9
Máximo C2	142,19	19,0	46,3	4,1	3075,4	21,2
Mínimo C2	30	13,43	31,43	3,06	1390,83	10,91

APÊNDICE D – CONCENTRAÇÃO DE DQO

Tabela D.1 – Resultados do monitoramento do afluente e efluente ao WCV-FS quanto a concentração de DQO

Datas	DQO afluente ao WCV-FS	DQO efluente ao WCV-FS
20/10/2020	517,3	76
23/10/2020	930,7	47,3
25/11/2020	251,8	57,3
26/11/2020	2975,1	44,2
28/11/2020	394	48,6
29/11/2020	782,9	87
03/12/2020	669,6	44,2
19/12/2020	1035,1	19,6
22/12/2020	358,5	28,8
12/01/2021	257,9	45,8
14/01/2021	387,5	27,9
16/01/2021	225,1	60,1
23/01/2021	880,8	57
30/01/2021	206,4	51,5
03/02/2021	155,3	22,4
08/02/2021	280,3	80,1
09/02/2021	188,6	63,1
17/03/2021	265,3	45
30/03/2021	458,6	75,8
Média	590,6	51,7
Desvio padrão	638,7	19,3
Máximo	2975,1	87
Mínimo	155,3	19,6