

DENIS LEOCÁDIO TEIXEIRA

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DA CAPACIDADE DE
EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES/POLUENTES EM SISTEMAS
ALAGADOS CONSTRUÍDOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

T266m
2018
Teixeira, Denis Leocádio, 1989-
Modelagem da evapotranspiração e da capacidade de
extração de nutrientes/poluentes em sistemas alagados
construídos / Denis Leocádio Teixeira. – Viçosa, MG, 2018.
xiv, 91f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Antonio Teixeira de Matos.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.84-91.

1. Alagadiços. 2. Evapotranspiração. 3. Biomassa vegetal -
Produtividade. 4. Águas residuais. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22 ed. 628.3

DENIS LEOCÁDIO TEIXEIRA

**MODELAGEM DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO E DA CAPACIDADE DE
EXTRAÇÃO DE NUTRIENTES/POLUENTES EM SISTEMAS
ALAGADOS CONSTRUÍDOS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 16 de fevereiro de 2018.



Marcos Von Sperling



Ann Honor Mountheer



Aristéa Alves Azevedo



Mateus Pimentel de Matos
(Coorientador)



Antonio Teixeira de Matos
(Orientador)

*Dedico este trabalho à memória do meu querido pai,
Antônio Gomes Teixeira, que sempre esteve do meu lado,
me incentivando e mostrando a realidade da vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao criador Jesus Cristo, que sempre me iluminou e me deu forças nesta caminhada. Gostaria de agradecer a minha noiva Delilah, não só pela ajuda nos experimentos de campo, mas também pela paciência que teve comigo nos momentos difíceis. Obrigado princesa por se fazer presente na minha vida. À minha querida mãe, Elvira, que mesmo não compreendendo tecnicamente a finalidade da minha pesquisa, não mediu esforços para me apoiar. Agradeço à toda minha família, pelo carinho, amor e atenção, nos momentos felizes e nas dificuldades.

Aos meus amigos que se fizeram presente durante estes anos de luta, em especial à Suymara, Edcássio, Reginaldo, Cássio, Erlon e tantos outros que compartilhei informações e dúvidas de disciplinas ou de trabalhos experimentais. Também gostaria de agradecer ao Simão, José Antônio da área experimental, Gil, Sérgio, José Mauro, professores Alisson e Cecília e a todos os funcionários do DEA que sempre estiveram dispostos a me ajudar quando precisava. Aos estagiários, Liliane, Magno e Amanda, pela colaboração nos experimentos de campo e de laboratório.

Por último, mas não menos importante, ao meu orientador Antonio Teixeira de Matos, que me orientou desde a graduação, sempre confiando no meu trabalho e na minha dedicação. Aos meus coorientadores Mateus e Hamakawa, pelos conselhos e sugestões na condução deste trabalho e aos membros da banca, pela disponibilidade e contribuição para melhoria do trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

Denis Leocádio Teixeira, filho de Antônio Gomes Teixeira e Elvira de Oliveira Leocádio, nasceu em São Miguel do Anta no dia 20 de junho de 1989.

Até os dezessete anos morou com seus pais na comunidade da Fartura, zona rural da referida cidade. Desde muito cedo ajudava na lida no campo, e por se tratar de um trabalho muito exaustivo, viu nos estudos a oportunidade de um futuro melhor.

Em 2006, quando cursava o terceiro ano do ensino médio, além de receber uma menção honrosa, foi agraciado com uma bolsa de iniciação científica júnior como reconhecimento do seu desempenho na Olimpíada Brasileira de Matemática das Escolas Públicas.

Já em 2007 ingressou no curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, o qual se destacou dentre os seus pares recebendo na ocasião da formatura um certificado pelo seu excelente desempenho acadêmico, além de ser contemplado com a Medalha de Prata Presidente Bernardes.

No ano de 2012 iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, finalizando-o em 2014. Neste mesmo ano, iniciou o doutorado na mesma área de concentração do mestrado, submetendo-se a defesa de tese em fevereiro de 2018.

Não vos preocupeis por vossa vida, pelo que comereis, nem por vosso corpo, pelo que vestireis. Buscais em primeiro lugar o Reino de Deus e a sua justiça e todas estas coisas vos serão dadas em acréscimo.

Mateus 6: 25-33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de um sistema alagado construído com escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS).	6
Figura 2. Protótipos de SACs-EHSS construídos para o experimento.....	27
Figura 3. Equipamentos utilizados no preparo das soluções nutritivas.....	29
Figura 4. Gotejador GA-2 da AGROJET utilizado para aplicação da solução nutritiva.....	30
Figura 5. Protótipos de SACs-EHSS e dispositivos de aplicação e coleta da solução nutritiva.	30
Figura 6. SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário.....	34
Figura 7. Valores médios diários de Temperatura e Umidade Relativa do ar ao longo do período experimental.	36
Figura 8. Valores diários de Evapotranspiração de Referência (ET_0) e Precipitação obtidos durante o período experimental.	37
Figura 9. Coeficiente de cultura (K_C) em função da condutividade elétrica (CE), em diferentes datas do período de cultivo do capim-vetiver, nas Fases II e III de desenvolvimento vegetativo nos protótipos de SACs-EHSS.	40
Figura 10. Cobertura vegetal do capim-vetiver cultivados em solução nutritiva com valores de CE iguais a $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (b).	41
Figura 11. Coeficiente de cultura (K_C) em função da condutividade elétrica (CE), nas diferentes datas e nas Fases I, II e III de desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85 cultivado nos protótipos de SACs-EHSS.....	44
Figura 12. Cobertura vegetal em protótipos de SACs-EHSS cultivados com capim-tifton 85 e alimentados com solução nutritiva de CE $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (b).	44
Figura 13. Curvas de produtividade (Prod.) de matéria seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85 em função da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva de alimentação dos diferentes protótipos de SACs-EHSS.	49
Figura 14. Teor de nitrogênio (N) no tecido vegetal e capacidade de extração de nitrogênio (Ext. N) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas em protótipos de SACs-EHSS.....	56
Figura 15. Teor de fósforo (P) no tecido vegetal e capacidade de extração de fósforo (Ext. P) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.	61

Figura 16. Teor de potássio (K) no tecido vegetal e capacidade de extração de potássio (Ext. K) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas em protótipos de SACs-EHSS.	66
Figura 17. Valores diários de evapotranspiração (ET_C) dos capins vetiver e tifton 85, e de precipitação, monitorados ao longo do período experimental nos SACs-EHSS em escala plena.	71
Figura 18. Valores médios de condutividade elétrica no esgoto sanitário em tratamento ao longo dos SACs-EHSS em escala plena, cultivados com os capins vetiver e tifton 85, por ocasião das datas de corte das plantas.	72
Figura 19. Valores estimados e reais de K_C , em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85 cultivado em SAC-EHSS em escala plena.	74
Figura 20. Aspecto visual do desenvolvimento do capim-tifton 85, respectivamente aos 0, 8, 16 e 24 dias após efetuado o corte, da sua parte aérea, cultivado em SACs-EHSS construídos em escala plena e utilizados no tratamento de esgoto sanitário.	76
Figura 21. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de produtividade de matéria seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE no esgoto sanitário, para diferentes condições de temperatura e épocas do ano.	77
Figura 22. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de N, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.	79
Figura 23. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de P, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para as diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.	80
Figura 24. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de K, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.	82

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Concentração dos nutrientes na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950).....28
- Tabela 2.** Concentrações de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo (P) e potássio (K) nas soluções nutritivas avaliadas neste trabalho.29
- Tabela 3.** Valores médios de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na) no esgoto sanitário afluente aos SACs-EHSS durante o período de condução do experimento.35
- Tabela 4.** Valores médios de K_C do capim-vetiver na Fase I de desenvolvimento vegetativo para diferentes datas.38
- Tabela 5.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados do polinômio de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustado de K_C em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as diferentes datas e fases de cultivo nos protótipos de SACs-EHSS.42
- Tabela 6.** Valores médios de K_C do capim-vetiver para as diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo.42
- Tabela 7.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro e segundo graus ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de K_C em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as diferentes datas e fases de desenvolvimento do capim-tifton 85 nos protótipos de SACs-EHSS.46
- Tabela 8.** Valores médios de K_C do capim-tifton 85 para as diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo em protótipos de SAC-EHSS.47
- Tabela 9.** Valores totais de ET_C dos capins vetiver e tifton 85 em função da CE da solução nutritiva durante o período de cultivo nos protótipos de SACs-EHSS.48
- Tabela 10.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as respectivas datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.51
- Tabela 11.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as respectivas datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.53
- Tabela 12.** Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de

extração de N pelo capim-vetiver (Ext. N) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}), para as diferentes datas de corte quando cultivado nos protótipos de SACs-EHSS..... 57

Tabela 13. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de extração de N pelo capim-tifton 85 (Ext. N) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, nas diferentes datas de corte dessas plantas, quando cultivadas em protótipos de SACs-EHSS. 59

Tabela 14. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de P pelo capim-vetiver (Ext. P) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS. 62

Tabela 15. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de P pelo capim-tifton 85 (Ext. P) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS. 64

Tabela 16. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de K pelo capim-vetiver (Ext. K) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS. 67

Tabela 17. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de extração de K (Ext. K) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) pelo capim-tifton 85, em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS. 68

RESUMO

TEIXEIRA, Denis Leocádio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Modelagem da evapotranspiração e da capacidade de extração de nutrientes/poluentes em sistemas alagados construídos.** Orientador: Antonio Teixeira de Matos. Coorientadores: Mateus Pimentel de Matos e Paulo José Hamakawa.

Por ser a tecnologia dos sistemas alagados construídos de escoamento horizontal subsuperficial (SACs-EHSS) relativamente recente, ainda são poucos os estudos que contemplam a medição ou estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_C), de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelas plantas cultivadas, ao longo desses sistemas de tratamento. No entanto, sabe-se que essas informações são de grande importância para o projeto, a operação, a avaliação e a modelagem hidrológica de SACs-EHSS. Assim, com a realização deste trabalho, teve-se por objetivo a obtenção de modelos matemáticos para estimativa da ET_C , da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da capacidade de extração de N, P e K pelo capim-tifton 85 (*Cynodon* spp.) e capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*), cultivados em protótipos de SACs-EHSS submetidos à aplicação de soluções nutritivas contendo diferentes valores de condutividade elétrica (CE). Os protótipos foram construídos em alvenaria, com formato retangular e dimensões médias de 0,92 m de largura, 0,73 m de comprimento e 0,35 m de altura, totalizando uma área superficial de 0,68 m². Os cortes da parte aérea das plantas foram realizados mensalmente, sendo o balanço hídrico realizado todos os dias às 9 h, com a finalidade de se determinar a ET_C e o K_C dos capins. A partir dos dados de produção de matéria seca da parte aérea e dos teores de N, P e K nas plantas, foram obtidos os modelos de capacidade de extração de cada nutriente/poluento pelos capins vetiver e tifton, em função da CE na solução nutritiva. Para validação dos modelos, SACs-EHSS também foram operados em condições de escala plena, no tratamento de esgoto sanitário, sendo para isso utilizadas unidades nas dimensões de 4 m de comprimento e 1 m de largura, cultivadas individualmente com capim vetiver e tifton 85. O experimento foi conduzido no período de 5 de março a 17 de novembro de 2016, contemplando estações quentes e frias do ano. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que os valores de K_C do capim-vetiver independeram da CE na solução nutritiva, entretanto, a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e as extrações de N, P e K pelo referido capim aumentaram linearmente com o aumento da CE. Em relação ao capim-tifton 85, foram ajustados modelos quadráticos de K_C , de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e de extração de N, P e K, em função da CE da solução nutritiva. Apesar dos modelos ajustados neste trabalho não terem sido capazes de estimar, com precisão, todas as variáveis avaliadas, recomenda-se o emprego das equações

obtidas nas estimativas dos valores de ET_C , de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da extração de N, P e K, como fonte preliminar de informação no projeto e operação de SACs-EHSS.

ABSTRACT

TEIXEIRA, Denis Leocádio, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Modeling the evapotranspiration and capacity for nutrient/pollutant extraction in constructed wetlands.** Adviser: Antonio Teixeira de Matos. Co-advisers: Mateus Pimentel de Matos and Paulo José Hamakawa.

The technology of horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSSF-CW) is relatively new and there are therefore few studies that evaluate the measurement or estimation of crop evapotranspiration (ET_C), the dry biomass productivity of plant shoots and the nutrient/pollutant extraction capacity of the cultivated plants along these treatment systems. However, it is known that this information is of great importance for the design, operation, evaluation and hydrological modeling of HSSF-CW. The objective of this work was therefore to obtain mathematical models for estimation of the ET_C , the dry biomass productivity of plant shoots and the N, P and K extraction capacity of tifton 85 grass (*Cynodon* spp.) and vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides*) cultivated in HSSF-CW prototypes submitted to the application of nutrient solutions containing different electrical conductivity values (EC). The prototypes were constructed of concrete becks, with rectangular shape and average dimensions of 0.92 m width, 0.73 m length and 0.35 m height and a total surface area of 0.68 m². The plant shoots were cut monthly, and the water balance was confirmed every day at 9 am, in order to determine the ET_C and K_C of the grasses. From the shoot dry matter production data and the N, P and K levels in the plants, models of extraction capacity of each nutrient/pollutant by the vetiver and tifton 85 grasses were obtained, in function of the EC in the nutrient solution. In order to validate the models, HSSF-CW were also operated under full scale conditions for the treatment of sanitary sewage, using units with dimensions 4 m in length and 1 m in width, individually cultivated with the vetiver and tifton 85 grasses. The experiment was conducted during the period from March 5 to November 17, 2016, considering both the hot and cold seasons of the year. From the results obtained, it was verified that the K_C values of the vetiver grass were independent of the EC in the nutrient solution, however the dry shoot biomass productivity and the N, P and K extractions by the referred grass increased linearly with the increase in EC. In relation to the tifton 85 grass, quadratic models of K_C , dry shoot biomass productivity and N, P and K extraction were adjusted as a function of EC of the nutrient solution. Although the models adjusted in this study were not able to accurately estimate all the evaluated variables, they are recommended for use to estimate, dry biomass productivity of the plant shoots and extraction of N, P and K as a preliminary source of information for the design and operation of the HSSF-CW.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. Objetivo geral	3
2.2. Objetivos específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Sistemas Alagados Construídos.....	5
3.2. Estimativa da Evapotranspiração da cultura em SACs.....	8
3.2.1. Métodos Empíricos.....	11
3.2.2. Método do balanço de energia.....	12
3.2.3. Método da covariância de turbilhões.....	14
3.2.4. Métodos combinados.....	14
3.3. Evapotranspiração de Referência FAO 56.....	15
3.4. Coeficientes de cultura (K_C) em SACs-EHSS	20
3.5. Produtividade de biomassa vegetal aérea em SACs-EHSS	22
3.6. Capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelas plantas em SACs-EHSS.....	23
4. MATERIAL E MÉTODOS	27
4.1. Experimento em protótipos de SACs para obtenção dos modelos	27
4.2. Validação dos modelos obtidos em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário.....	33
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1. Experimento em protótipos de SACs-EHSS	36
5.1.1. Modelagem da ET_C dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS	38
5.1.2. Modelagem da produtividade de biomassa vegetal aérea dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS	49
5.1.3. Modelagem da capacidade de extração de nutrientes/poluentes dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS	55
5.1.3.1. Nitrogênio (N)	55
5.1.3.2. Fósforo (P)	60
5.1.3.3. Potássio (K).....	65
5.2. Validação dos modelos obtidos para SACs-EHSS tratando esgoto sanitário.....	70

5.2.1. Validação dos modelos de estimativa da ET_c	72
5.2.2. Validação dos modelos de estimativa da produtividade.....	76
5.2.3. Validação dos modelos de estimativa da capacidade de extração de nutrientes ...	78
5.2.3.1. Nitrogênio (N)	78
5.2.3.2. Fósforo (P)	80
5.2.3.3. Potássio (K).....	81
6. CONCLUSÃO	83
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

1. INTRODUÇÃO

Sistemas Alagados Construídos (SACs), também designados como *Wetlands* construídos e terras úmidas construídas, foram concebidos a partir da observação da melhoria na qualidade da água em sistemas alagados naturais. Esse sistema de tratamento visa maximizar as reações físicas, químicas e biológicas que ocorrem naturalmente nos sistemas alagados, possibilitando maior eficiência na depuração de águas residuárias. De acordo com Kadlec e Wallace (2009), a eficiência na remoção de nutrientes/poluentes dessas unidades é influenciada pelas condições meteorológicas, notadamente temperatura, radiação solar e precipitação, adequando-se perfeitamente às condições ambientais de países de clima tropical, que possuam áreas disponíveis à sua implantação.

Sendo um reator aberto, sujeito à ação das condições ambientais, os Sistemas Alagados Construídos de Escoamento Horizontal Subsuperficial (SACs-EHSS) são propensos a perdas hídricas, que influenciam na hidrodinâmica das unidades. Assim, o balanço hídrico é um procedimento essencial para o dimensionamento, a operação, a modelagem hidrológica e a avaliação da eficiência desses sistemas de tratamento (PEDESCOLL *et al.*, 2013) que, no caso de sistemas impermeabilizados, deve ser constituído pelas vazões afluente e efluente, precipitação, evaporação, em SACs-EHSS não cultivados, e evapotranspiração, em SACs-EHSS cultivados.

As perdas de água para a atmosfera em SACs-EHSS cultivados constituem processo complexo que envolve a evaporação direta da água do meio suporte e a transpiração das plantas, sendo estes dois processos denominados evapotranspiração quando ocorrem concomitantemente (KADLEC e WALLACE, 2009). A transpiração das plantas depende das condições meteorológicas do ar (radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade relativa do ar), das características da cultura (espécie, fase de desenvolvimento vegetativo e densidade de plantio), e de outros fatores ambientais (ocorrência de doenças, salinidade e fertilidade do meio suporte) (ALLEN *et al.*, 1998; PEDESCOLL *et al.*, 2013).

Sendo a evapotranspiração a principal maneira de perda de água em SACs-EHSS instalados em regiões de clima tropical e, principalmente, em regiões de clima seco e quente, a evapotranspiração da cultura (ET_C) cultivada nos SACs-EHSS influencia na eficiência de tratamento, uma vez que diminui o volume de água residuária e a vazão efluente, aumentando o tempo de detenção hidráulica e a concentração de nutrientes/poluentes na água residuária em tratamento (BORIN *et al.*, 2011; PEDESCOLL *et al.*, 2013). Por outro lado, a absorção da solução saturante do meio poroso pelas plantas proporciona assimilação de nutrientes/poluentes da água residuária, aumentando a eficiência de sua remoção (KADLEC e WALLACE, 2009).

Existem diversos métodos para estimativa da ET_C em SACs-EHSS, sendo estes divididos em métodos indiretos e métodos diretos.

Dentre os métodos indiretos, está o do tanque Classe A, que já foi muito utilizado no passado, para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) e, posteriormente, da ET_C . Outros métodos indiretos são aqueles que utilizam desde simples equações empíricas até complexos modelos matemáticos que incluem diversas variáveis meteorológicas (HEADLEY *et al.*, 2012), sendo que o método do balanço de energia tem sido recomendado para estimativa da ET_C em SACs-EHSS de grandes dimensões. Atualmente, métodos mais precisos e que apresentam melhores resultados, como os que utilizam a evapotranspiração de referência e o coeficiente de cultura, têm sido utilizados (KADLEC e WALLACE, 2009).

De acordo com Allen *et al.* (1998), a estimativa da ET_C pode ser obtida ao se multiplicar a evapotranspiração de referência (ET_0) pelo coeficiente de cultura (K_C), sendo a ET_0 calculada a partir da equação de Penman-Monteith FAO 56, considerando a evapotranspiração de uma cultura vegetal hipotética com certas características fixas e pré-definidas. Valores de K_C são obtidos experimentalmente, em condições em que não haja limitação ao crescimento e à evapotranspiração da planta, ou seja, em ocasiões em que a cultura esteja livre da ocorrência de pragas, doenças, estresse hídrico ou salino.

Dentre os métodos diretos para estimativa da ET_C , o método do lisímetro é o mais utilizado, principalmente em pesquisas, devido à sua exatidão. De acordo com esse método, a planta é cultivada em tanques impermeabilizados enterrados no solo, condição que possibilita o monitoramento das variáveis componentes do balanço hídrico (ALLEN *et al.*, 1998). Em SACs-EHSS impermeabilizados, a ET_C pode ser obtida de forma direta, por meio do balanço hídrico realizado quando se monitora a vazão afluyente e a efluente do sistema, contabilizando-se a precipitação ocorrida no período.

Concomitantemente à absorção de água, ocorre a absorção de nutrientes/poluentes pelas plantas cultivadas nos SACs-EHSS, que os utilizam para o seu crescimento, sendo esse um dos principais mecanismos dessa extração das águas residuárias tratadas nesses sistemas (MATOS *et al.*, 2009). A extração de nutrientes pelas plantas cultivadas em SACs-EHSS é função da produtividade da cultura, a qual varia com a disponibilidade de nutrientes e evapotranspiração da cultura (KADLEC e WALLACE, 2009). No período de crescimento, as plantas absorvem macro e micronutrientes, e ainda, podem extrair ou possibilitar a transformação de substâncias contendo metais pesados e compostos orgânicos tóxicos.

Apesar de as plantas apresentarem alto potencial de extração de nutrientes/poluentes de SACs-EHSS, é essencial o adequado manejo desses sistemas, por meio de cortes frequentes da

parte aérea das plantas, visando aumentar seu potencial de absorção, uma vez que maiores taxas de absorção ocorrem na fase de desenvolvimento vegetativo (KADLEC e WALLACE, 2009). Ao mesmo tempo, a absorção de nutrientes/poluentes pelas plantas varia em função da espécie cultivada, das características da solução absorvida, das condições climáticas da região, dependendo, principalmente, da temperatura e da radiação solar, além do estágio de desenvolvimento vegetativo da planta.

De acordo com avaliações realizadas, a produtividade de biomassa vegetal aérea das plantas cultivadas em SACs-EHSS aumenta com a disponibilidade de nutrientes na água residuária em tratamento, podendo ser representadas por um modelo polinomial quadrático. Após alcançar a máxima produtividade, o aumento na concentração dos nutrientes pode causar toxicidade, reduzindo o crescimento da planta (KADLEC e WALLACE, 2009), comportamento este semelhante ao apresentado pelas culturas agrícolas. Encontram-se na literatura modelos de estimativa do crescimento e da produtividade de biomassa vegetal de plantas aquáticas baseados em princípios fisiológicos, como taxas de fotossíntese e respiração (CARR *et al.*, 1997), porém, a complexidade envolvida nesses modelos os tornam de difícil utilização e aplicação.

Apesar de existirem estudos correlacionando a produtividade de biomassa vegetal aérea e a capacidade de extração de nutrientes, nas diferentes posições de SACs-EHSS (MATOS *et al.*, 2009; AVELAR *et al.*, 2016), ainda não foram desenvolvidos modelos matemáticos para estimativa da capacidade de extração de nutrientes ao longo desses sistemas. Considerando-se que o projeto, a operação, a avaliação e a modelagem hidrológica de SACs-EHSS, possam ser aperfeiçoados, caso se tenha maiores informações em relação à evapotranspiração da cultura (ET_C) e capacidade de extração de nutrientes pelas plantas, torna-se imprescindível o estudo dessas variáveis ao longo desses sistemas de tratamento.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

No presente trabalho, teve-se como objetivo geral a obtenção de modelos matemáticos para estimativa da evapotranspiração da cultura (ET_C), da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da capacidade de extração de nutrientes/poluentes das plantas, ao longo de SACs-EHSS cultivados com o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) e capim-tifton 85 (*Cynodon* spp.), que apresentam variações nos valores de CE na água residuária em tratamento.

2.2. Objetivos específicos

- Obter modelos de estimativa do coeficiente de cultura (K_C) para os capins vetiver e tifton 85, nos diferentes estádios de desenvolvimento vegetativo da cultura e em função da condutividade elétrica da solução nutritiva saturante do meio poroso;
- Obter modelos de estimativa da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da condutividade elétrica da solução nutritiva saturante do meio poroso;
- Obter modelos de estimativa da capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelos capins vetiver e tifton 85, em função da condutividade elétrica da solução nutritiva saturante do meio poroso;
- Validar os modelos obtidos utilizando-se dados de ET_C , de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da capacidade de extração de nutrientes/poluentes, comparando os valores estimados aos resultados provenientes de SACs-EHSS cultivados com os capins vetiver e tifton 85 utilizados no tratamento de esgoto sanitário.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Sistemas Alagados Construídos

Sistemas Alagados Construídos (SACs) têm sido utilizados em vários países, com objetivo de tratar esgotos sanitários, águas de escoamento superficial, águas residuárias industriais e agroindustriais. Caracterizam-se como sistemas robustos de baixo custo e simplicidade de operação e manutenção (PRATA *et al.*, 2013), ideais para aplicação em regiões carentes de saneamento básico. Trata-se de um sistema desenvolvido recentemente, tendo sua disseminação ocorrida após pesquisas realizadas pelo Instituto Max Planck, localizado no oeste da Alemanha em 1952. No entanto, somente a partir de 1985 os SACs passaram a ser mais utilizados no tratamento de águas residuárias, se difundindo pela Europa e EUA, e depois alcançando outros países. Apesar da complexidade dos mecanismos físicos, químicos e biológicos envolvidos nos processos de remoção, são unidades de tratamento que apresentam grande simplicidade operacional e elevadas eficiências na remoção de nutrientes/poluentes, sendo recomendados para áreas rurais e locais com baixa densidade populacional (KADLEC e WALLACE, 2009).

Devido ao baixo custo de construção, operação e manutenção, quando comparado a outras alternativas de tratamento, constitui boa opção para países em desenvolvimento. Segundo Kadlec e Wallace (2009), SACs podem ser construídos utilizando diferentes configurações em relação ao modelo, ao meio suporte, às espécies de plantas cultivadas e, principalmente, no que se refere ao sentido e forma de escoamento, os quais podem ser de escoamento horizontal superficial, de escoamento horizontal subsuperficial ou de escoamento vertical. O sistema mais utilizado é o Sistema Alagado Construído de Escoamento Horizontal Subsuperficial (SAC-EHSS), que consiste na utilização de um tanque impermeabilizado preenchido com material filtrante, no qual o líquido percorre toda a sua extensão, saindo pela extremidade horizontalmente oposta à de entrada. São cultivados com espécies vegetais e apresentam meio saturado com a água residuária em tratamento, escoando abaixo da superfície do meio filtrante, sendo a tubulação de saída a responsável pelo controle da altura saturada desejada (Figura 1).

Nos SACs-EHSS, a água residuária é tratada à medida que escoar através dos interstícios do material filtrante e do sistema radicular das plantas, sendo, deste modo, recomendados para tratamento de águas residuárias contendo baixo teor de sólidos ou de efluentes provenientes de um sistema de tratamento primário. De acordo com Kadlec e Knight (1996), em razão da sua

elevada eficiência, esses sistemas são frequentemente utilizados para tratamento de esgoto sanitário após o tanque séptico, águas residuárias provenientes da pecuária, da mineração, da indústria, lixiviados de aterros sanitários e águas de escoamento superficial das zonas urbanas e rurais.

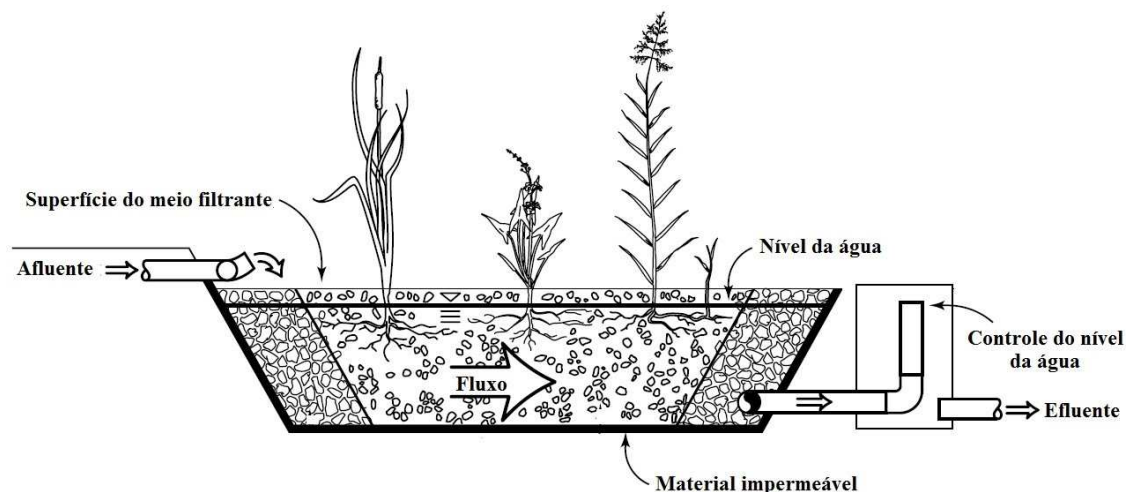


Figura 1. Esquema de um sistema alagado construído com escoamento horizontal subsuperficial (SAC-EHSS).

Fonte: Adaptado de Kadlec e Wallace (2009)

A grande aplicabilidade dos SACs-EHSS no tratamento de diferentes tipos de águas residuárias se dá pela apresentação de algumas vantagens em relação às demais configurações possíveis. Essas unidades apresentam elevada eficiência na remoção da DBO, sólidos suspensos, nitrogênio, fósforo, metais, compostos orgânicos e patógenos, além de manter o nível da água residuária abaixo da superfície do leito, o que torna mínimo o risco de usuários se contaminarem com agentes patogênicos (KADLEC e KNIGHT, 1996).

Em relação às plantas, uma grande variedade de espécies podem ser cultivadas em SACs-EHSS. Porém, a seleção da melhor opção deve considerar alguns aspectos como: as condições climáticas da região; o tipo de água residuária a ser tratada; a produtividade, a capacidade de extração de nutrientes/poluentes e, principalmente, a destinação final da biomassa vegetal aérea após o frequente, e necessário, corte da parte aérea das plantas. As plantas, além de proporcionar um aspecto agradável aos SACs-EHSS, auxiliam no processo de tratamento, aumentando a eficiência na remoção dos poluentes do sistema. De acordo com Kadlec e Wallace (2009), SACs-EHSS vegetados apresentam maior eficiência de tratamento comparado aos não vegetados, uma vez que as plantas exercem papel fundamental na remoção de nutrientes/poluentes da água residuária em tratamento, principalmente, quando estão em pleno desenvolvimento vegetativo e expressam a máxima absorção de nutrientes.

Dentre os principais benefícios da presença das plantas em SACs, podem ser destacados: formação de ambientes aeróbios próximos ao sistema radicular, favorecendo o crescimento de bactérias heterotróficas e autotróficas; fornecimento de carbono para os microrganismos a partir dos exsudatos das raízes; absorção de nutrientes/poluentes; melhoria nas condições hidráulicas do meio, além de proporcionar aumento na superfície específica do meio, facilitando a fixação do biofilme bacteriano (BIAŁOWIEC *et al.*, 2014).

No Brasil, existe grande variedade de espécies vegetais com potencial de cultivo em SACs-EHSS, sendo o capim-vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) e o capim-tifton 85 (*Cynodon* spp.) espécies comumente utilizadas nesses sistemas de tratamento (MATOS *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2009; MATOS *et al.*, 2010; FIA *et al.*, 2011; DREIFUS, 2012; UCKER *et al.*, 2012; UCKER e ALMEIDA, 2013; FIA *et al.*, 2015; JESUS, 2016; FIA *et al.*, 2017). A utilização do capim-vetiver em SACs teve início na Austrália, em meados do ano 2000. Por se tratar de espécie classificada como C4, apresenta elevada eficiência na utilização da radiação solar, aliada às elevadas taxas de crescimento e adversidades ambientais suportadas (alta salinidade e solos alagados), tornaram o capim-vetiver uma planta ideal a ser cultivada em SACs (VIERITZ *et al.*, 2003). A constatação do melhor desempenho do capim-vetiver na remoção de nitrogênio e fósforo em SACs, em relação à outras espécies, aumentou o interesse de pesquisadores e projetistas em utilizar essa planta nos sistemas de tratamento de águas residuárias. O capim-tifton 85, por sua vez, além de ser uma forrageira que possui bom valor comercial, por conter altos teores de proteína bruta e outros nutrientes, importantes para a alimentação de animais, apresenta grande produtividade de matéria seca e alta capacidade de remoção de nutrientes em SACs-EHSS (MATOS *et al.*, 2010; FIA *et al.*, 2011).

O desenvolvimento vegetativo das plantas ao longo do comprimento dos SACs-EHSS pode apresentar grande variação de acordo com a disponibilidade de nutrientes no meio, sendo os valores de condutividade elétrica (CE) da solução saturante do meio, a principal variável utilizada para monitoramento do sistema. De acordo com Jesus (2016), a perda de água em SACs por meio da evapotranspiração da cultura é o principal fator responsável pelo aumento nos valores de CE da solução saturante. Freedman *et al.* (2014), avaliando a extração de sais e a evapotranspiração em SACs-EHSS cultivados com plantas halófitas, observaram que os valores de CE na água residuária aumentavam com o desenvolvimento vegetativo das plantas e reduzia logo após o corte da parte aérea das plantas. Esses resultados demonstram que a extração de nutrientes pelas plantas tende a reduzir os valores de CE da solução saturante do meio, no entanto, ao mesmo tempo a perda de água por meio da evapotranspiração eleva a

concentração dos nutrientes, sendo o resultado final dependente de qual fator agirá com maior intensidade.

Fia *et al.* (2015) e Fia *et al.* (2017) observaram que, durante a operação dos SACs-EHSS utilizado no tratamento de água residuária da suinocultura, os valores de CE do efluente diminuíram em relação ao do afluente, devido à precipitação de sais no meio e a absorção de íons (nutrientes/poluentes) pelas plantas. Os autores esperavam, no entanto, aumento desses valores com o tratamento, como consequência da degradação do material orgânico presente na água residuária e a consequente liberação de íons em solução, e em decorrência das perdas de água por evapotranspiração, que, dessa forma, proporcionariam aumento na concentração iônica no efluente. Conforme já comentado anteriormente, o balanço hídrico no sistema é fator de grande influência nos resultados de aumento ou diminuição na CE efluente em relação ao afluente, sendo, por essa razão, necessário maior entendimento e modelagem desse processo.

3.2. Estimativa da Evapotranspiração da cultura em SACs

A perda de água para a atmosfera em SACs-EHSS ocorre pela evaporação da água presente no meio suporte e pela transpiração das plantas. A combinação destes dois processos é conhecida como evapotranspiração da cultura (ET_C) (KADLEC e WALLACE, 2009). De acordo com Pereira *et al.* (2013), a ET_C expressa a demanda de água, para uma condição de clima local, de uma cultura em bom estado fitossanitário, com fertilidade do solo adequada e com condições hídricas suficientes para obtenção de boa produtividade.

Além de influenciar no desenvolvimento da planta, a ET_C desempenha papel fundamental no comportamento hidrológico dos SACs-EHSS e na eficiência do tratamento, uma vez que diminui o volume de água residuária e a vazão efluente, aumentando o tempo de detenção hidráulica (TDH) e a concentração de poluentes no meio, subestimando a eficiência do sistema (BRASIL e MATOS, 2008; KADLEC e WALLACE, 2009; CHAZARENC *et al.*, 2010; BORIN *et al.*, 2011; PEDESCOLL *et al.*, 2013; BEEBE *et al.*, 2014; LIOLIOS *et al.*, 2014). Por essa razão, segundo Brasil e Matos (2008), a avaliação da eficiência de remoção dos poluentes em sistemas alagados construídos (SACs) deve ser realizada por meio de balanço de massa, a qual considera a carga removida e não a concentração dos poluentes no afluente e efluente do sistema.

De acordo com Beebe *et al.* (2014), a ET_C poderá reduzir a eficiência do tratamento em SACs, quando a água residuária apresentar componentes resilientes, como por exemplo, sódio e cloreto, resultando em aumento da salinidade da água. Entretanto, a eficiência na remoção de constituintes de fácil degradação é pouco influenciada pela ET_C , pois, o aumento na

concentração de poluentes no meio, causada pela perda de água para a atmosfera é contornado pelo aumento no TDH do sistema. Como resultado, projetos de SACs utilizados no tratamento de águas residuárias com valores elevados de coeficiente de remoção de matéria orgânica (em torno de $1,2 \text{ d}^{-1}$), podem ser dimensionados sem levar em consideração a ET_C .

Em regiões de clima árido e semiárido, o conhecimento dos valores de ET_C das plantas cultivadas em SACs é essencial, principalmente em projetos que necessitam de elevada eficiência de tratamento, ao mesmo tempo que a preservação da água para reúso na agricultura torna-se essencial. Para suprir essa necessidade, várias pesquisas foram realizadas visando a obtenção do coeficiente de cultura (K_C) do Caniço (*Phragmites australis*), por ser uma das espécies mais utilizadas no tratamento de águas residuárias em SACs-EHSS na Europa e na Ásia (BORIN *et al.*, 2011; HEADLEY *et al.*, 2012; MILANI e TOSCANO, 2013; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2015; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2016).

Borin *et al.* (2011), ao quantificarem a ET_C da espécie *Phragmites australis* cultivada em SACs-EHSS, no norte e no sul da Itália, encontraram valores distintos de ET_C para as regiões avaliadas, indicando a dependência da perda hídrica em relação às condições climáticas. Ainda de acordo com os autores, a ET_C também é influenciada pelo estágio de desenvolvimento vegetativo da cultura. Deste modo, a estimativa dos valores de ET_C deve ser realizada utilizando-se valores de K_C provenientes de estudos desenvolvidos em locais com características climáticas semelhantes, considerando-se ainda o mesmo estágio de desenvolvimentos vegetativo. Segundo Tuttoolomondo *et al.* (2016), o estágio de desenvolvimento vegetativo da planta apresenta grande influência na determinação da ET_C em SACs-EHSS, pois está correlacionada com a produtividade de biomassa vegetal aérea, e, conseqüentemente, da superfície foliar exposta às perdas hídricas. Segundo Chazarenc *et al.* (2010), SACs com longos períodos de operação, apresentam maior produtividade de biomassa vegetal aérea e maior evapotranspiração da cultura, como consequência das melhores condições de crescimento proporcionadas pela matéria orgânica acumulada no decurso do tempo nesses sistemas de tratamento.

A estimativa da ET_C em SACs-EHSS pode ser realizada a partir dos métodos utilizados para culturas agrícolas, com algumas modificações. Esses métodos podem ser divididos em diretos e indiretos. Dentre os métodos diretos para estimativa da ET_C em culturas agrícolas, o método do lisímetro é o mais utilizado, principalmente em pesquisas, devido à sua precisão. Nesse método, a planta é cultivada em tanques enterrados no solo, condição que possibilita a medição do volume drenado e, conseqüentemente, o monitoramento das variáveis constituintes do balanço hídrico (ALLEN *et al.*, 1998). Devido à semelhança entre o lisímetro e os SACs-

EHSS, em termos de volume de controle, a ET_C nesses sistemas também pode ser obtida por meio do balanço hídrico.

O balanço hídrico em SACs-EHSS impermeabilizados pode ser realizado com grande simplicidade, pois a partir do monitoramento da vazão afluyente, da vazão efluente e da precipitação, obtém-se a evapotranspiração da cultura (Equação 1). Este é o método padrão de estimativa da ET_C , sendo utilizado para calibração de métodos indiretos, no entanto, exige recursos financeiros, mão de obra e tempo, sendo mais indicado para pesquisas (KADLEC e WALLACE, 2009; BORIN *et al.*, 2011).

$$ET_C = \frac{(Q_a - Q_e)}{A} + P \quad (1)$$

em que,

ET_C - evapotranspiração da cultura (mm d^{-1});

Q_a - vazão afluyente (L d^{-1});

Q_e - vazão efluente (L d^{-1});

A - área superficial do SAC-EHSS (m^2);

P - precipitação (mm d^{-1}).

Para facilitar o monitoramento dos componentes do balanço hídrico em SACs-EHSS, pode-se utilizar equipamentos que realizam medidas automatizadas da precipitação, da vazão afluyente e efluente ao sistema. Estes instrumentos podem ser acoplados a um sistema de aquisição de dados, fornecendo resultados mais confiáveis, e possibilitando a obtenção da evapotranspiração da cultura, em escala horária (BRANDON LOTT e HUNT, 2001; XU *et al.*, 2011).

A ET_C em SACs-EHSS é influenciada, principalmente, pela radiação solar, sendo diretamente responsável pelo aquecimento do ar, do meio suporte e, conseqüentemente, da água residuária em tratamento, portanto, maiores valores de ET_C tendem a ocorrer no período de verão e os menores no de inverno (PAPAEVANGELOU *et al.*, 2010). Os métodos de estimativa da evapotranspiração variam dos mais simples, que só consideram a temperatura do ar, até os mais complexos que envolvem o balanço de energia. Alguns destes métodos possibilitam a estimativa da evapotranspiração da cultura por meio da evapotranspiração de referência (ET_0) e do coeficiente de cultura (K_C), necessitando, portanto, de dados meteorológicos para o cálculo da ET_0 . A estimativa da ET_C em SACs-EHSS, utilizando este método, é amplamente empregada, notadamente em sistemas de pequenas dimensões (KADLEC e WALLACE, 2009). O valor de K_C varia com a cultura e com seu estágio de desenvolvimento vegetativo e o fator

determinante essa variação é a área foliar que se modifica ao longo do ciclo de crescimento (PEREIRA *et al.*, 2013). Esses valores são obtidos experimentalmente, em condições em que não haja limitação ao crescimento e à evapotranspiração da planta, ou seja, cultura esteja livre da ocorrência de pragas, doenças, estresse hídrico ou salino (ALLEN *et al.*, 1998).

A evapotranspiração contribui para dissipação de energia e arrefecimento nos SACs-EHSS, sendo, portanto, componente do balanço de energia destes sistemas. Em SACs-EHSS de grandes dimensões a radiação solar é a principal força motora do processo evapotranspirativo, porém, em sistemas menores, a evapotranspiração pode ser significativamente influenciada pela advecção de calor sensível de áreas mais secas circundantes. Deste modo, existe grande variedade de métodos de estimativa da evapotranspiração, podendo ser separados em 4 grupos: Métodos Empíricos, Método do Balanço de energia, Método da Covariância de turbilhões (*Eddy Covariance*) e Métodos Combinados (aerodinâmico + balanço de energia) (ALLEN *et al.*, 1998; DREXLER *et al.*, 2004; WALLACE *et al.*, 2005; KADLEC e WALLACE, 2009; BORIN *et al.*, 2011; HEADLEY *et al.*, 2012; KUMAR *et al.*, 2012; RASHED, 2014).

3.2.1. Métodos Empíricos

Métodos empíricos são métodos baseados em correlações estatísticas entre a ET_C medida em lisímetro e algum elemento do clima ou índice climático. Sua utilização é indicada para locais onde não haja medidas de todos os elementos meteorológicos para utilização de métodos teoricamente mais completos (PEREIRA *et al.*, 2013). De acordo com Fernandes *et al.* (2010), existem várias metodologias desenvolvidas para estimativa da evapotranspiração, entretanto, poucas possuem aplicação prática para todas as condições climáticas, sendo necessário muitas vezes, o ajuste dos coeficientes das equações.

Os métodos empíricos utilizados para estimativa da evapotranspiração podem ser classificados em quatro categorias: métodos baseados unicamente em dados de temperatura média do ar; métodos baseados em combinações de temperatura do ar e radiação incidente; métodos baseados na combinação de temperatura do ar e pressão de vapor e métodos baseados em dados de evaporação (FERNANDES *et al.*, 2010).

A seguir, será enfatizado o método baseado em dados de evaporação, por ser muito utilizado em estudos de evapotranspiração em SACs.

➤ Método do Tanque Classe A

Dentre os métodos empíricos, o do Tanque Classe A pode ser considerado o mais simples, tendo sido muito utilizado no passado para estimativa da ET_0 para áreas de irrigação. O Tanque Classe A, além de apresentar custo relativamente baixo e manejo simplificado, possui, como vantagem, a determinação de forma direta da evaporação de uma superfície de água livre, a qual está associada aos efeitos integrados da radiação solar, do vento, da temperatura e da umidade relativa do ar (BERNARDO *et al.*, 2008). Além disso, a grande disponibilidade de dados para diferentes localidades o torna indicado para estimativa da ET_C em SACs (KADLEC e WALLACE, 2009).

O tanque é fabricado em chapa de aço galvanizado, com 1,21 m de diâmetro e 0,30 m de profundidade, devendo ser pintado interna e externamente com tinta aluminizada, e instalado sobre um estrado de madeira, a 0,15 m da superfície do solo, geralmente, numa área gramada. A altura interna da água deve ficar próxima de 5 cm da borda, sendo reabastecido quando estiver a 7,5 cm. Para facilitar as medidas, há um poço tranquilizador de 0,25 m de altura e 0,10 m de diâmetro, em cuja borda se assenta um parafuso micrométrico de gancho, com capacidade para medir variações de 0,01 mm. Na base do tranquilizador há um orifício, através do qual a água penetra, mantendo-se o mesmo nível médio do restante do tanque, porém sem a influência do vento nas medições. A evapotranspiração de referência pode ser obtida após a multiplicação da evaporação medida no Tanque Classe A, pelo coeficiente do tanque (K_P). O valor de K_P varia em função da velocidade do vento, da umidade relativa do ar, das dimensões da área de contorno e das condições de cobertura vegetal em que o solo se encontra (PEREIRA *et al.*, 1997; ALLEN *et al.*, 1998).

Em SACs-EHSS cultivados, a ET_C pode ser calculada utilizando-se dados provenientes do Tanque Classe A e coeficientes de cultura obtidos experimentalmente para as mesmas condições (WALLACE *et al.*, 2005). De acordo com Kadlec e Wallace (2009), em períodos de crescimento vegetativo intenso em SACs-EHSS, a ET_C pode ser considerada em torno de 0,7 a 0,85 da lâmina evaporada do tanque, para condições de clima temperado.

3.2.2. Método do balanço de energia

Balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície, sendo a radiação eletromagnética a principal responsável pelo aquecimento da superfície terrestre. Em função do comprimento das ondas, a radiação eletromagnética pode ser dividida em ondas curtas, ou radiação no espectro solar, e ondas

longas, também denominada radiação infravermelha. A radiação solar é denominada de ondas curtas, por outro lado, a atmosfera e a superfície do solo também emitem radiação, no entanto, devido à baixa temperatura desses meios, os comprimentos de onda dessa radiação são relativamente grandes em relação aos da radiação solar, sendo denominados "radiação de ondas longas".

O balanço de energia em SACs tem como principal componente a radiação solar incidente, a qual é parcialmente refletida, sendo a restante absorvida pelas plantas e superfície do sistema, podendo ser convertida parcialmente em calor latente de vaporização. A transpiração causa dissipação de energia nas plantas, enquanto a evaporação causa o arrefecimento da superfície, sendo a primeira predominante no processo de perda de água nos SACs e em superfícies vegetadas (KADLEC, 2006; PEDESCOLL *et al.*, 2013). O saldo de radiação (R_N) é utilizado pela superfície nos processos de evaporação (calor latente), aquecimento do ar (calor sensível), do solo (calor sensível), e das plantas (calor sensível), e na fotossíntese (calor fotoquímico) (PEREIRA *et al.*, 1997), deste modo, há transformação da energia radiante em calor latente, sensível e fotoquímico.

A quantidade de energia utilizada na fotossíntese raramente chega a 3% do total absorvido pela vegetação, portanto, em termos quantitativos, pode ser desconsiderada sem acarretar erro substancial no balanço de energia de uma área vegetada. Estando o solo da área vegetada bem suprido com água, a ET_C passa a ser o principal destino da energia absorvida, cujo valor pode variar de acordo com o poder refletor da superfície (PEREIRA *et al.*, 1997).

Grande parte da energia radiativa que atinge os SACs-EHSS é convertida em calor latente pela mudança de fase da água de líquido para vapor, sendo que, em média, a ET_C pode representar 50% da energia absorvida por esses sistemas, em base anual (KADLEC e WALLACE, 2009). Além disso, a energia armazenada pelo SAC é, geralmente, desconsiderada por ser pouco significativo em relação ao saldo de radiação, para períodos diários ou mensais (KADLEC, 2006).

De acordo com Headley *et al.* (2012), a estimativa da ET_C em SACs-EHSS a partir do balanço de energia é considerada complexa, além de demandar muitas variáveis meteorológicas e do sistema, dificultando o seu uso em muitas situações. Este método é recomendado para estimativa da ET_C em SACs de grandes extensões, pois com a diminuição do tamanho, a energia transferida por advecção se torna um componente importante no balanço de energia. Há, portanto, dois fatores que levam ao aumento da perda de água nos SACs, o primeiro está relacionado à maior taxa de evaporação, em consequência do aquecimento da mesma, já o segundo está relacionado ao microclima criado pelo SAC, sendo o efeito de bordadura e o efeito

oásis os que mais afetam os pequenos sistemas. Esses dois fatores podem contribuir para o aumento na ET_C em regiões áridas, uma vez que o ar quente e seco aumenta a quantidade de energia que entra no sistema (KADLEC e WALLACE, 2009).

3.2.3. Método da covariância de turbilhões

A interação da atmosfera com a superfície resulta no aparecimento de turbilhões, que se movem aleatoriamente, mudando constantemente de posição, misturando-se com turbilhões de outros níveis. Esse processo de agitação contínua de mistura, resulta em deslocamentos horizontais e verticais, com conseqüente transporte das propriedades atmosféricas de um lado para outro. Um turbilhão ascendente vai de um nível de maior concentração de vapor de água para outro de menor, logo, há transporte de vapor de água na camada próxima à superfície para os níveis superiores (PEREIRA *et al.*, 2013).

Este é um método micrometeorológico e, portanto, dependente de equipamentos extremamente sensíveis e sofisticados acoplados a sistemas computacionais de processamento intenso de dados, em tempo real. Embora sua teoria seja relativamente simples, sua execução exige conhecimentos operacionais especializados, sendo justificado apenas em projetos de pesquisas (PEREIRA *et al.*, 1997; ALLEN *et al.*, 1998; PEREIRA *et al.*, 2013). Segundo Xu *et al.* (2011), estas são as principais limitações para a utilização deste método na estimativa da ET_C em SACs-EHSS.

3.2.4. Métodos combinados

Os métodos combinados resultam da associação do método aerodinâmico com o balanço de energia, resultando assim, em métodos robustos que consideram todos os aspectos físicos que afetam a evapotranspiração. Dentre esses métodos, o de Penman-Monteith é o mais utilizado para estimativas da evapotranspiração de referência, sendo recomendado como padrão pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998).

O método de Penman-Monteith, parametrizado por pesquisadores da FAO (ALLEN *et al.*, 1998), é um dos modelos mais utilizados e recomendados para estimativa da ET_0 , em qualquer condição climática. O método assume uma superfície cultivada com vegetação hipotética, com altura fixa de 0,12 m, resistência ao transporte de vapor d'água (r_c) constante, igual a 70 s m^{-1} e, albedo de 0,23. Com este conceito fica implícito que a ET_0 seria o padrão de consumo hídrico na região, se houvesse uma vegetação com as características da superfície de referência plenamente abastecida de água. A utilização deste método necessita do registro

contínuo da radiação solar e da velocidade dos ventos para se obter um valor médio diário, sendo requeridos apenas valores máximos e mínimos diários da temperatura e da umidade relativa do ar (PEREIRA *et al.*, 2013).

A utilização da equação de Penman-Monteith FAO 56 para estimativa da ET_0 e, posteriormente, da ET_C , é amplamente utilizado em SACs-EHSS (WALLACE *et al.*, 2005; KADLEC e WALLACE, 2009; BORIN *et al.*, 2011; HEADLEY *et al.*, 2012; BEEBE *et al.*, 2014), sendo recomendada sua padronização para estimativa da ET_0 nesses sistemas, conforme realizado para cultivos agrícolas (DREXLER *et al.*, 2004; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2015). No entanto, o cálculo da ET_C utilizando a ET_0 proveniente da equação de Penman-Monteith FAO 56, deve ser realizado com cautela em pequenos SACs, onde há significativa transferência de calor por convecção e, conseqüentemente, valores superestimados de ET_C (KADLEC e WALLACE, 2009). Dada a sua importância, o método será detalhado no item a seguir.

3.3. Evapotranspiração de Referência FAO 56

Em maio de 1990, um grupo de especialistas convidados pela FAO (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*), optaram pelo método de Penman-Monteith como padrão internacional de estimativa da ET_0 , por fornecer estimativas mais confiáveis em diversos tipos de clima. Deste modo, definiu-se a evapotranspiração de referência padrão FAO, estimada pela equação de Penman-Monteith parametrizada para dados em escala temporal diária (PEREIRA *et al.*, 2013):

$$ET_0 = \frac{0,408 s (R_N - G) + \frac{900 \gamma u_2}{(T_{méd} + 273)} (e_s - e_a)}{s + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad (2)$$

em que,

ET_0 - evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

R_N - saldo de radiação na superfície (MJ m⁻² d⁻¹);

G - calor sensível do solo (MJ m⁻² d⁻¹);

$T_{méd}$ - temperatura média diária do ar a 2 m de altura (°C);

u_2 - velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s - pressão de vapor na saturação (kPa);

e_a - pressão de vapor real (kPa);

$(e_s - e_a)$ - déficit de pressão de vapor (kPa);

s - declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹);

γ - coeficiente psicométrico (kPa °C⁻¹).

O termo parametrização refere-se ao processo matemático e estatístico de simplificar a estimativa de variáveis de difícil medição, tendo por objetivo operacionalizar sua utilização rotineira. Isto pode ser obtido substituindo-se a variável por uma constante, atribuindo um valor médio, ou ainda substituindo por uma função de outra variável de fácil medição (PEREIRA *et al.*, 2013).

A determinação da ET_0 é realizada a partir dos dados de temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, os quais podem ser coletados em estações meteorológicas automáticas com frequência horária. No entanto, utilizando-se a Equação 2, que estima a ET_0 em escala diária, deve-se proceder algumas transformações nos dados coletados. A seguir, será realizada uma abordagem considerando cada variável, adotando-se, como referência o trabalho de Allen *et al.* (1998).

➤ Temperatura do ar

A radiação solar absorvida pela atmosfera e o calor emitido pela Terra, aumentam a temperatura do ar e o calor sensível do ar passa a ser, então, uma forma de energia transferível às plantas, influenciando no processo evapotranspirativo. Em geral, localidades em que o clima seja quente apresentam maior perda de água por evapotranspiração em relação aos que o clima seja frio.

Para o cálculo da ET_0 , utiliza-se apenas as temperaturas máxima e mínima diária observadas em um período de 24 h, que inicia-se à meia noite. A temperatura média para o período de 24 h, além de ser utilizada de forma explícita na Equação de Penman-Monteith FAO 56, também é requisitada no cálculo da declividade da curva de pressão de vapor, sendo sua estimativa obtida a partir dos dados de temperaturas máxima e mínima, ao invés da média das temperaturas horárias:

$$T_{méd} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (3)$$

em que,

T_{max} - temperatura máxima diária do ar a 2 m de altura (°C);

T_{min} - temperatura mínima diária do ar a 2 m de altura (°C).

➤ Umidade relativa do ar

Enquanto as energias provenientes do Sol e do ar são as principais forças motoras do processo de vaporização da água, a diferença entre a pressão de vapor da superfície em processo evapotranspirativo e do ar circundante é o fator determinante para a remoção do vapor. Em clima tropical úmido, apesar da alta energia disponível, a elevada umidade do ar, próximo à saturação, reduz o processo evapotranspirativo.

Para o cálculo da ET_0 , utiliza-se a pressão de vapor de saturação e a pressão de vapor atual, a qual pode ser determinada a partir da umidade relativa máxima e mínima diária. A pressão de vapor de saturação está relacionada à temperatura do ar, sendo o cálculo do valor médio diário (e_s), realizado conforme as equações apresentadas a seguir:

$$e_s = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2} \quad (4)$$

$$e^o(T_{max}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_{max}}{T_{max} + 237,3} \right] \quad (5)$$

$$e^o(T_{min}) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right] \quad (6)$$

A média diária da pressão de vapor atual (e_a) é obtida a partir da umidade relativa máxima e mínima diária (Equação 7).

$$e_a = \frac{e^o(T_{max})UR_{min} + e^o(T_{min})UR_{max}}{200} \quad (7)$$

em que,

UR_{max} - umidade relativa máxima diária (%);

UR_{min} - umidade relativa mínima diária (%).

A média diária do déficit de pressão de vapor é determinada conforme estabelecido na seguinte equação:

$$D_a = e_s - e_a \quad (8)$$

Mesmo em locais em que haja uma estação climática automatizada disponível, recomenda-se que D_a seja estimado em função apenas dos valores extremos de temperatura (T_{max} e T_{min}) e de umidade relativa (UR_{max} e UR_{min}), isto é, com os valores pontuais extremos. Essa recomendação tem como base a não linearidade na relação entre a pressão de vapor na saturação e a temperatura do ar (PEREIRA *et al.*, 2013).

A declividade da curva de pressão de vapor é estimada utilizando-se a temperatura média do ar (Equação 9).

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{méd}}{T_{méd} + 237,3} \right) \right]}{(T_{méd} + 237,3)^2} \quad (9)$$

➤ Radiação solar

A radiação solar, também conhecida como radiação de ondas curtas, após penetrar na atmosfera, parte é difundida, refletida ou absorvida pelos gases da atmosfera, nuvens e sólidos em suspensão. Deste modo, apenas uma fração da energia solar é utilizada no processo evapotranspirativo.

O saldo de radiação na superfície (R_n) utilizado no cálculo da ET_0 é a diferença entre a radiação absorvida, refletida e emitida, considerando-se a radiação de ondas curtas e longas (Equação 10).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (10)$$

em que,

R_{ns} - saldo de radiação de ondas curtas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$);

R_{nl} - saldo de radiação de ondas longas ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O valor de R_n é normalmente positivo durante o dia e negativo durante a noite, sendo o total diário (período de 24 h) sempre positivo, exceto em localidades situadas em altas latitudes.

O saldo de radiação de ondas curtas é obtido utilizando-se a seguinte equação:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (11)$$

em que,

α - albedo, igual a 0,23 para a vegetação hipotética de referência (adimensional);

R_s - radiação solar incidente sobre a superfície ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

O saldo de radiação de ondas longas é estimado da seguinte forma:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} \right] \left(0,34 - 0,14 \sqrt{e_a} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (12)$$

em que,

σ - constante de Stefan Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ K}^{-4} \text{ dia}^{-1}$);

R_{so} - radiação solar para dias sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

As unidades das temperaturas utilizadas na Equação 12, devem ser em Kelvin (K). O valor da radiação solar para dias sem nuvens (R_{so}), representa a energia incidente sobre a superfície durante todo o fotoperíodo ou o número máximo de brilho solar, podendo ser calculado por:

$$R_{so} = (0,75 - 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (13)$$

em que,

z - altitude do local (m);

R_a - radiação extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

A radiação extraterrestre para cada dia do ano e para as diferentes latitudes, pode ser calculada a partir da constante solar, declinação solar e época do ano (Equação 14).

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (14)$$

em que,

G_{sc} - constante solar ($0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$);

d_r - distância relativa Terra-Sol (rad);

ω_s - ângulo horário do pôr-do-sol (rad);

φ - latitude local (rad);

δ - declinação solar (rad).

Na Equação 14, a latitude é expressa em radianos, assumindo valores positivos para o hemisfério norte e negativos para o hemisfério sul.

A distância relativa Terra-Sol e a declinação solar são estimadas, respectivamente, por:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (15)$$

$$\delta = 0,409 \text{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (16)$$

Sendo J o número do dia do ano, compreendido entre 1 (1 de janeiro) e 365 ou 366 (31 de dezembro).

O ângulo horário do pôr-do-sol pode ser determinado, segundo a Equação 17.

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (17)$$

➤ **Velocidade do vento**

O processo de remoção de vapor é muito influenciado pela velocidade do vento, uma vez que a evaporação de uma superfície ocasiona a saturação do ar próximo a esta. Caso não haja renovação deste ar por outro mais seco, o processo de evaporação diminui.

A velocidade do vento em estações agrometeorológicas é medida a 2 metros da superfície e pode apresentar grandes variações durante o dia, deste modo, utiliza-se a velocidade média do período considerado.

➤ **Fluxo de calor sensível no solo**

O fluxo de calor sensível no solo (G) é a energia utilizada em seu aquecimento, sendo positivo quando a superfície do solo está aquecendo e negativo quando está resfriando. Dada à pequena magnitude do fluxo líquido diário de calor sensível no solo, quando comparado ao saldo de radiação (R_n), esse pode ser desprezado. No entanto, teoricamente, a quantidade de energia ganha ou perdida pelo solo deveria ser subtraída ou adicionada no saldo de radiação utilizado no cálculo da ET_0 .

Estimativas de ET_0 para períodos inferiores a 10 dias podem ser realizadas considerando G igual a zero, mesmo em locais nos quais essas medidas existam. Na prática, isto significa eliminar um sensor de difícil instalação e sem nenhuma utilidade computacional para estimativas da ET_0 (PEREIRA *et al.*, 2013). Considerando o exposto anteriormente e que os SACs-EHSS na maioria das vezes são enterrados em relação à superfície do solo, o fluxo de calor sensível no meio pode ser considerado igual a zero (BORIN *et al.*, 2011).

3.4. Coeficientes de cultura (K_C) em SACs-EHSS

Informações sobre coeficientes de cultura (K_C) têm sido provenientes de pesquisas realizadas em lisímetros utilizando-se diferentes culturas agrícolas e condições climáticas. No entanto, ainda existem muito poucos desses estudos em SACs-EHSS. Segundo Tuttolomondo *et al.* (2015), valores de K_C obtidos para culturas agrícolas não podem ser utilizados para estimativa da ET_C em SACs-EHSS, pois as condições do ambiente são totalmente diferenciadas, como por exemplo: no desenvolvimento da planta em substrato inerte; água residuária servindo como fonte de nutrientes; e a inserção da cultura em um ambiente continuamente alagado.

A estimativa da ET_C , realizada a partir dos valores de ET_0 e K_C , possui grande importância na hidrologia de SACs, pois, além de constituir um dos principais componentes do balanço hídrico, influencia a quantidade e a qualidade do efluente, afetando o reúso da água em

regiões carentes de recursos hídricos (BORIN *et al.*, 2011). Beebe *et al.* (2014), estudando o efeito da evapotranspiração na eficiência do tratamento em SACs cultivados com *Typha latifolia*, encontraram um valor médio de K_C igual a 2,5 a partir da ET_0 calculada pelo método de Penman-Monteith FAO 56. Segundo os mesmos autores, diferenças nos valores de K_C podem ser atribuídas ao tamanho do sistema, região e tipo de planta, e quando esses coeficientes são obtidos para uma determinada condição, deve-se tomar o cuidado, no entanto, com sua extrapolação para não levar a estimativas equivocadas.

Como o coeficiente de cultura em SACs varia de local para local, estação do ano, período de desenvolvimento vegetativo e características do SAC, não existe na literatura valores de K_C que abranjam todas essas particularidades. Headley *et al.* (2012) afirmaram que, por esse motivo, esses sistemas devem ser considerados inapropriados para regiões de climas quentes e secos, caso se queira fazer reúso, dada à baixa eficiência no uso da água, uma vez que a cultura se adapta às situações em que a água não é fator limitante, aumentando-se as taxas de evapotranspiração, principalmente, em regiões quentes e com alta incidência de ventos.

A produtividade de biomassa vegetal aérea apresenta correlação positiva com a ET_C dos SACs-EHSS, deste modo, melhores condições de crescimento da cultura repercutem em elevadas produtividades de biomassa vegetal aérea, que afetam diretamente os valores de K_C durante o ciclo produtivo (CHAZARENC *et al.*, 2010; FREEDMAN *et al.*, 2014). Headley *et al.* (2012), estudando a ET_C do Caniço (*Phragmites australis*) em SACs-EHSS, verificaram aumento nos valores médios anuais de K_C com o desenvolvimento da cultura, passando de 1,9 no primeiro ano, para 2,6 no segundo ano, sendo esses valores calculados com base em dados de evaporação provenientes do Tanque Classe A.

A evapotranspiração de culturas cultivadas em SACs apresenta grande variação, sendo os maiores valores obtidos no verão e os menores no inverno. No verão, a temperatura se torna mais elevada e as plantas apresentam o máximo desenvolvimento vegetativo. Já no inverno, há redução nos valores de ET_C , uma vez que as plantas entram em senescência (HEADLEY *et al.*, 2012; PAPAEVANGELOU *et al.*, 2012; ANDA *et al.*, 2014; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2015; SANCHEZ *et al.*, 2016; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2016).

Em um estudo realizado por Freedman *et al.* (2014) em SACs vegetados, foi constatado que ao manter o nível da água a 10 cm abaixo da superfície do material suporte, os valores de evapotranspiração variaram entre 19,5 a 41,8 mm d⁻¹. Já a evaporação do Tanque Classe A instalado próximo aos SACs foi de 10,6 mm d⁻¹, resultando em valores de K_C em torno de 1,8 a 4,0. Brasil e Matos (2008), avaliando os aspectos hidráulicos e hidrológicos de SACs-EHSS, encontraram valores médios de coeficiente de cultura para taboa (*Typha sp*) variando de 2,22 a

4,58. De acordo com os autores, o valor de K_C na primeira medição foi de 3,00, período em que os brotos da taboa estavam com altura em torno de 1,3 m, na segunda medição, o valor de K_C foi de 4,58, quando as plantas se encontravam em pleno desenvolvimento vegetativo, com altura em torno de 2,0 m, e já haviam iniciado o florescimento. Na terceira amostragem, período coincidente com o início da senescência das plantas, o valor de K_C foi de 3,28. Com base nos resultados obtidos, verifica-se a influência do estágio fenológico das plantas no valor de K_C , sendo o decréscimo do seu valor atribuído à menor área foliar, que proporciona redução na transpiração das plantas.

Florença *et al.* (2007) e Pinto *et al.* (2007), avaliando a evapotranspiração dos capins Elefante cv. Napier (*Pennisetum purpureum*) e tifton 85, cultivados em SACs nas condições climáticas de Viçosa-MG, encontraram valores de K_C para os referidos capins variando de 2,2 a 4,6 e 2,5 a 3,8, respectivamente. De acordo com os autores, os elevados valores de K_C são decorrentes da alta capacidade transpiratória dessas plantas, proporcionada pela constante saturação do meio de cultivo.

3.5. Produtividade de biomassa vegetal aérea em SACs-EHSS

Segundo Kadlec e Wallace (2009), a produtividade de biomassa vegetal aérea de plantas cultivadas em SACs-EHSS aumenta com a disponibilidade de nutrientes no meio. No entanto, após alcançada a máxima produtividade, o aumento na concentração dos nutrientes pode causar toxicidade, reduzindo o crescimento da planta. Avelar *et al.* (2016), avaliando o desempenho agrônomico da *Mentha aquatica* cultivada em SAC-EHSS, no tratamento de esgoto sanitário, observaram que o aumento na taxa de carregamento orgânico aplicada aos SACs proporcionou aumento na produtividade de biomassa vegetal aérea, sendo ajustado um modelo polinomial quadrático de produtividade em função da taxa de carregamento orgânico. Ainda de acordo com esses autores, houve variação na produtividade de biomassa vegetal aérea ao longo dos SACs, consequência da disponibilização de nutrientes pela degradação do material orgânico acumulado nos sistemas.

Matos *et al.* (2008) verificaram aumento na produtividade de matéria seca do capim-tifton 85 cultivado em SACs-EHSS com elevação das taxas de carregamento orgânico provenientes das águas residuárias de laticínios. Essa condição foi observada até a carga aplicada de 500 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO, quando houve tendência de redução na produtividade de matéria seca, tendo sido a máxima produtividade de, aproximadamente, 15 t ha⁻¹, obtida aos 45 dias de cultivo. Valor esse inferior à produtividade média de 28 t ha⁻¹ de matéria seca da parte aérea de capim-tifton, obtida por Matos *et al.* (2009), quando cultivado por um período de 90

dias em SACs-EHSS utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. De acordo com Fia *et al.* (2011), valores intermediários de taxa de carregamento orgânico propiciam maior desenvolvimento vegetativo do capim-tifton. Deste modo, taxas menores não proporcionam disponibilidade adequada de nutrientes para as plantas, enquanto taxas maiores podem provocar toxicidade às plantas, devido à elevada disponibilidade de nutrientes/poluentes no meio.

O desenvolvimento vegetativo das plantas em SACs também é influenciado pelas estações do ano: em períodos quentes, como no verão, as plantas tendem a se desenvolver melhor; no inverno, a maioria das espécies reduzem sua taxa de crescimento devido às baixas temperaturas do período. Gao *et al.* (2014), avaliando a remoção de nutrientes e o desenvolvimento vegetativo de *Iris sibirica* em sistema alagado construído com escoamento vertical, não encontraram diferença significativa entre a produtividade de biomassa vegetal aérea, durante o período de inverno, para plantas submetidas a diferentes concentrações de nutrientes. Segundo os autores, a baixa temperatura verificada no período foi a principal responsável pelo baixo desenvolvimento vegetativo das plantas, contribuindo para uniformização na produtividade das plantas cultivadas em soluções com diferentes concentrações de nutrientes.

A produtividade de biomassa vegetal aérea também pode apresentar variação ao longo dos SACs-EHSS, principalmente, quando se trata de sistemas com grande comprimento. Na parte inicial do sistema há maior concentração de nutrientes, devido à disponibilização ocasionada pela degradação do material orgânico acumulado neste trecho. Já na parte final, a disponibilidade de nutrientes tende a se reduzir, consequência da absorção pelas plantas e reações de precipitação que ocorrem ao longo do sistema (MATOS *et al.*, 2009; AVELAR *et al.*, 2016). Deste modo, tanto a evapotranspiração quanto a extração de nutrientes pelas plantas podem variar ao longo desses sistemas. De acordo com Tuttolomondo *et al.* (2015), quando as condições climáticas são favoráveis ao desenvolvimento das plantas, a produtividade de biomassa vegetal aérea apresenta correlação positiva com a evapotranspiração, independentemente das configurações do sistema, das condições de operação e dos parâmetros hidráulicos utilizados. Papaevangelou *et al.* (2012) obtiveram, por meio de análises de regressão, equações que relacionam a produtividade de biomassa vegetal aérea com a ET_C acumulada nos SACs, sendo encontrada alta correlação.

3.6. Capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelas plantas em SACs-EHSS

Os processos de transporte de solutos para as plantas são controlados, basicamente, pelas membranas celulares. O movimento de solutos através de membranas, a favor de seu

gradiente de energia livre, é facilitado pelos mecanismos de transporte passivo. Porém, o movimento de soluto contrário ao seu gradiente de energia livre, conhecido como transporte ativo, requer gastos de energia. A absorção de nutrientes pelas plantas ocorre inicialmente de forma passiva, sem gasto de energia, sendo a absorção ativa iniciada apenas se a absorção passiva não for suficiente para suprir a demanda nutricional (TAIZ e ZEIGER, 2013).

A absorção de nutrientes pelas plantas é um dos principais mecanismos de extração dos nutrientes/poluentes dos SACs-EHSS. De acordo com Matos *et al.* (2009), as plantas utilizam os nutrientes da água residuária para o seu crescimento, atuando como extratoras de grande parte dos nutrientes/poluentes. No período de crescimento, as plantas podem absorver macro e micronutrientes e, ainda, extrair metais pesados e possibilitar a transformação de compostos orgânicos tóxicos.

As plantas são consideradas elementos biológicos dos SACs que possuem grande importância nos processos de transformação e remoção de nutrientes/poluentes da água residuária em tratamento. O acúmulo de N e P na biomassa vegetal aérea é determinado pela produtividade e pela concentração dos nutrientes nos tecidos, sendo o potencial de absorção de nutrientes pelas plantas, geralmente, limitado pela produtividade ou taxa de crescimento e pelo teor de nutrientes nos tecidos das plantas (GAO *et al.*, 2014). Segundo Dee e Ahn (2014), em sistemas alagados naturais existe correlação positiva entre a produtividade de biomassa vegetal aérea e a absorção de nutrientes, de modo que os teores de nutrientes presentes no tecido vegetal e a produtividade são utilizadas na estimativa da capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelas plantas.

O máximo potencial de absorção de nutrientes pelas plantas é limitado pela produtividade de biomassa vegetal aérea e pelo teor de nutrientes no tecido vegetal. A remoção de N e P proporcionado pelas plantas é considerada pequena, no entanto, o corte frequente da biomassa vegetal aérea contribui para maior remoção de nutrientes pelas plantas e evita a disponibilização desses na senescência da cultura (VYMAZAL, 2007). Para que as plantas apresentem alto potencial de extração de nutrientes/poluentes, quando cultivadas em SACs-EHSS, é essencial o adequado manejo desses sistemas, por meio de corte frequente de sua parte aérea, visando-se aumentar seu potencial de absorção, uma vez que maior taxa de absorção ocorre na fase de desenvolvimento vegetativo das plantas (KADLEC e WALLACE, 2009), proporcionado logo após efetuado o corte. Ao mesmo tempo, a absorção de nutrientes/poluentes pelas plantas varia com a espécie cultivada; características da solução absorvida; condições climáticas na região, principalmente temperatura e radiação solar; e do estágio de desenvolvimento vegetativo das plantas.

De acordo com Avelar *et al.* (2016), maiores taxas de carregamento orgânico favorecem a maior disponibilidade de nutrientes na água residuária em tratamento, contribuindo para o aumento de produtividade de biomassa vegetal aérea e, simultaneamente, aumento nos teores de nitrogênio, potássio e sódio presentes no tecido vegetal. Matos *et al.* (2009), avaliando a capacidade extratora do capim-tifton cultivados em SACs utilizados no tratamento de água residuária da suinocultura, observaram que as maiores taxas de remoção de nutrientes ocorriam no início do sistema, indicando ser o acúmulo de MO e a liberação de nutrientes responsável por esse resultado. Segundo Gao *et al.* (2014), quanto maior a concentração de nutrientes no efluente em tratamento, maior será a extração pelas plantas, até se atingir um ponto de máximo, que é característico de cada cultura. Ainda de acordo com os autores, o maior desenvolvimento do sistema radicular das plantas em SACs com elevada concentração de nutrientes proporciona maiores taxas de absorção, aumentando a extração do nutriente no sistema de tratamento. Fia *et al.* (2017), por outro lado, não encontraram diferença significativa na taxa de remoção de nutrientes da água residuária da suinocultura, quando compararam tratamentos em SACs vegetados e não vegetados. Todavia, de acordo como os autores, a baixa produtividade apresentada pelas culturas foi o principal responsável por esta constatação.

A escolha das espécies a serem cultivadas em SACs-EHSS deve ser realizada levando-se em consideração a produtividade de biomassa vegetal aérea e a extração de nutrientes da água residuária. Carballeira *et al.* (2016), avaliando os efeitos das plantas na eficiência de tratamento de SACs-EHSS, concluíram que a remoção de nitrogênio nesses sistemas correlaciona-se de forma linear com a produtividade de biomassa vegetal aérea. No entanto, os autores observaram que a produtividade de cada espécie depende da característica da cultura, de suas adaptações climatológicas e das condições do sistema de tratamento. Com base nisso, deve-se considerar que a escolha da espécie a ser cultivada em SACs-EHSS influenciará na eficiência de tratamento, sendo uma variável importante a ser considerada na concepção desse reator.

Toscano *et al.* (2015), comparando a eficiência de tratamento de SACs-EHSS cultivados com diferentes espécies vegetais, concluíram que o capim-vetiver apresentou potencial de uso nesses sistemas, principalmente em decorrência de seu grande desenvolvimento vegetativo. Corroborando o estudo anterior, Guimaraes *et al.* (2016) também encontraram elevada eficiência na remoção de nitrogênio e fósforo da água residuária da bovinocultura, em SACs-EHSS cultivados com capim-vetiver, sendo que a planta se adaptou muito bem ao sistema de tratamento, não demonstrando nenhum sintoma de deficiência nutricional. Segundo os autores,

a absorção de nitrogênio pelas plantas ocorreu principalmente pela forma de íon amônio, considerando-se o alto pH dessa água residuária.

De acordo com Fia *et al.* (2015), o cultivo do capim-tifton é indicado para SACs-EHSS utilizados no tratamento da água residuária da suinocultura, apresentando boa adaptação às elevadas cargas de nutrientes aplicadas. Segundo Garcia *et al.* (2015), a extração de nutrientes pelo capim-tifton correlaciona-se com a produtividade de biomassa vegetal aérea, sendo verificado aumento linear na extração de nutrientes para maiores cargas de nutrientes aplicadas.

Diante do apresentado, os capins vetiver e tifton tem boa adaptação e produtividade, e grande capacidade de remoção de nutrientes quando cultivados em SACs-EHSS, razão pela qual foram utilizados neste trabalho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Experimento em protótipos de SACs para obtenção dos modelos

O experimento foi conduzido na Área Experimental de Hidráulica, Irrigação e Drenagem do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. As coordenadas geográficas do local correspondem à latitude 20°46'08" S e longitude 42°51'44" W, com altitude média de 674 m.

A primeira fase do trabalho consistiu na avaliação do efeito da condutividade elétrica (CE) na evapotranspiração, na produtividade de biomassa vegetal aérea e na capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelo capim-vetiver e capim-tifton 85. Com este intuito, foi realizado o cultivo destas plantas em protótipos de SACs-EHSS, tendo o monitoramento sido feito no período de 5 de março a 17 de novembro de 2016. O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado (DIC), com seis tratamentos (níveis de salinidade) para cada espécie de planta cultivada. Cada protótipo de SACs-EHSS constituiu uma unidade experimental, totalizando 12 reatores.

Os protótipos foram construídos em alvenaria, com formato retangular e dimensões médias de 0,92 m de largura, 0,73 de comprimento e 0,35 m de altura, totalizando uma área superficial de 0,68 m² (Figura 2), para se aproximar de regime hidráulico de mistura completa.



Figura 2. Protótipos de SACs-EHSS construídos para o experimento.

Para impermeabilização dos protótipos, utilizou-se filme plástico para estufa agrícola de 150 micra, disposto em 2 camadas e fixados nas laterais do mesmo com auxílio de pregos e grampos. O sistema de drenagem foi confeccionado em tubos de PVC de 32 mm, sendo este perfurado e colocado em posição oposta ao da entrada da solução nutritiva, mantendo-se a altura

de saturação de 0,25 m. Os protótipos foram preenchidos com uma camada de 0,3 m de brita “número 0”, sendo as mudas do capim-vetiver e do capim-tifton 85 transplantadas com densidade de plantio de 12 propágulos por m².

A solução nutritiva utilizada como referência neste trabalho foi a de Hoagland e Arnon (1950), citado por Cometti *et al.* (2006), sendo as concentrações dos nutrientes na referida solução apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Concentração dos nutrientes na solução nutritiva de Hoagland e Arnon (1950).

NUTRIENTE	CONCENTRAÇÃO (mg L ⁻¹)
Nitrogênio (N-NO ₃ ⁻)	196,0
Nitrogênio (N-NH ₄ ⁺)	14,0
Fósforo (P-H ₂ PO ₄)	31,0
Potássio (K)	234,0
Cálcio (Ca)	160,0
Magnésio (Mg)	48,0
Enxofre (S-SO ₄)	64,0
Boro (B)	0,5
Cobre (Cu)	0,02
Ferro (Fe)	5,0
Manganês (Mn)	0,7
Molibdênio (Mo)	0,01
Zinco (Zn)	0,09

Para facilitar o preparo inicial e a manutenção das soluções nutritivas ao longo do período de condução do experimento, foram preparadas soluções estoque concentradas, contendo todos os nutrientes na mesma proporção da solução nutritiva de referência. Essas soluções estoques foram intituladas “A” e “B”, sendo considerada a solubilidade e a incompatibilidade dos sais, no preparo das soluções. Na solução A eram adicionados em água o fosfato monoamônico (MAP), sulfato de magnésio, nitrato de potássio, cloreto de ferro e EDTA dissódico, tendo em vista a formação do quelato FeEDTA, sendo o volume final completado para 10 litros. A solução B era constituída de nitrato de cálcio, cloreto de potássio, ácido bórico, sulfato de cobre, sulfato de manganês, molibdato de amônio e sulfato de zinco, totalizando 10 litros de solução.

Os valores de condutividade elétrica da solução nutritiva avaliados neste trabalho, foram de 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 dS m⁻¹. Esses valores foram estabelecidos, tendo como base a faixa de condutividade elétrica comumente encontrada em águas residuárias tratadas em SACs-

EHSS. O preparo das soluções nutritivas era realizado separadamente para cada valor de CE, sendo utilizada uma caixa d'água de polietileno, na qual se adicionava 180 L de água tratada e, em seguida, acrescentava-se a mesma quantidade das soluções estoques concentradas A e B, procedendo a mistura da solução manualmente. Concomitantemente, media-se os valores de CE da mistura utilizando-se um condutivímetro de bancada (Marca: Hach; Modelo: Sension 7), sendo adicionadas as soluções A e B até que o valor da CE estabelecido inicialmente fosse alcançado. Caso o valor da CE da solução ultrapassasse o valor previsto, adicionava-se mais água para corrigi-lo, posteriormente, media-se o valor do pH, utilizando-se um pHmetro de bancada (Marca: Quimis; Modelo: Q400AS), e se necessário esse era corrigido, adicionando-se soluções de ácido clorídrico ou hidróxido de sódio a 0,1 mol L⁻¹, até que o pH da solução nutritiva permanecesse entre 5,5 e 6,5 (Figura 3).

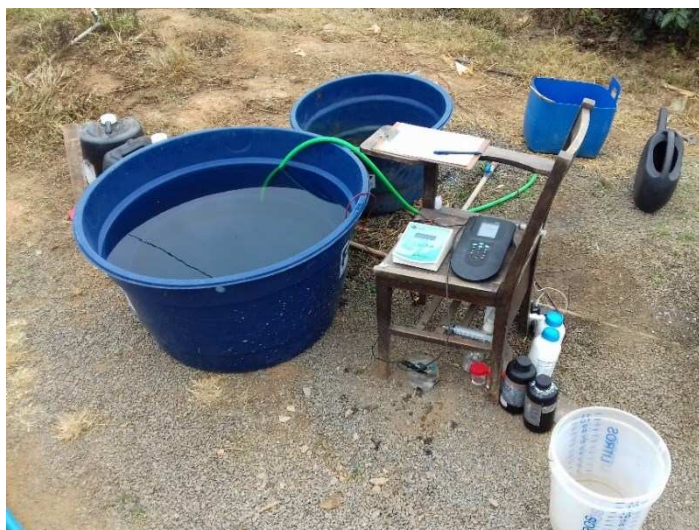


Figura 3. Equipamentos utilizados no preparo das soluções nutritivas.

Na Tabela 3, estão apresentadas as concentrações de nitrogênio total Kjeldahl, fósforo e potássio nas soluções nutritivas avaliadas neste trabalho.

Tabela 2. Concentrações de nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo (P) e potássio (K) nas soluções nutritivas avaliadas neste trabalho.

CE (dS m ⁻¹)	Concentrações (mg L ⁻¹)		
	NTK	P	K
0,2	11,52	0,83	6,55
0,5	38,26	3,85	24,32
1,0	82,83	8,88	53,94
1,5	127,40	13,92	83,56
2,0	171,97	18,95	113,18
3,0	261,10	29,02	172,42

O transplante das mudas do capim-vetiver e do capim-tifton 85 foi realizado no dia 5 de março de 2016, sendo utilizada para aclimação das mudas, solução nutritiva com condutividade elétrica de $0,7 \text{ dS m}^{-1}$. Após 30 dias, toda a solução nutritiva foi substituída pela solução com a condutividade elétrica pré-estabelecida, permanecendo neste valor até o corte das plantas no dia 16 de abril, data de início da coleta de dados do experimento.

A alimentação de cada protótipo de SAC-EHSS com a solução nutritiva foi realizada de maneira contínua, aplicando-se uma vazão média de $13,8 \text{ mL min}^{-1}$ (20 L d^{-1}) por meio do gotejador GA-2 da AGROJET, o qual possuía sistema de regulação de vazão. O gotejador foi instalado em mangueira de polietileno conectada a um galão de plástico (50 litros), por meio de conectores utilizados no início de linhas de sistemas de irrigação localizada (Figura 4).



Figura 4. Gotejador GA-2 da AGROJET utilizado para aplicação da solução nutritiva.

A solução nutritiva efluente era totalmente coletada e armazenada, em outro galão de plástico (50 litros), para realização do balanço hídrico. Na Figura 5 está apresentada a disposição dos protótipos de SACs-EHSS, juntamente com os dispositivos de aplicação e coleta da solução nutritiva.



Figura 5. Protótipos de SACs-EHSS e dispositivos de aplicação e coleta da solução nutritiva.

Todos os dias, às 9:00 horas da manhã, o volume da solução nutritiva remanescente no galão de entrada era despejado no protótipo e, em seguida, determinava-se o volume no galão de saída, por meio de baldes plásticos (capacidade de 11 L e precisão de 0,2 L), para realização do balanço hídrico e posterior determinação da evapotranspiração da cultura (ET_C), conforme apresentado na Equação 1.

A precipitação era quantificada por meio de uma estação meteorológica automática, instalada próxima ao experimento.

Após a medição dos volumes efluentes dos protótipos, adicionava-se água para completar o volume de 20 litros ou retirava-se parte da solução, quando a precipitação excedia a evapotranspiração. Em ambos os casos havia alteração nos valores de CE, sendo necessário realizar a correção para recirculação da solução nutritiva. As correções dos valores de CE foram realizadas por meio da adição de água ou solução estoque de nutrientes, sendo posteriormente, corrigidos os valores de pH e medido novamente os 20 litros a serem adicionados no galão de entrada. A substituição total da solução nutritiva era realizada de 15 em 15 dias, para evitar prejudicial desbalanceamento de nutrientes, conforme recomendações de Martinez e Clemente (2011).

Os cortes da parte aérea das plantas foram realizados de 30 em 30 dias, sendo o primeiro corte realizado em 16 de abril e o último em 16 de novembro de 2017, totalizando 7 cortes. Para determinação da produtividade de matéria fresca e seca da parte aérea, quantificou-se a massa fresca e a massa seca, obtida após secagem em estufa com ventilação forçada a 65 °C e a 105 °C, até se obter massa constante (MATOS, 2015). A análise nutricional foi realizada com as amostras secas a 65 °C, sendo inicialmente trituradas em moinho com rotor de facas e, posteriormente, quantificados os teores dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K).

As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Solos e Resíduos Sólidos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, conforme recomendações de Kiehl (1985) e Matos (2015), para análise de tecido vegetal. O nitrogênio total foi quantificado de acordo com o processo semi-micro Kjeldahl, já o fósforo e o potássio, foram quantificados após a digestão nítrico-perclórica das amostras, utilizando-se o espectrofotômetro e o fotômetro de chama, respectivamente.

Os coeficientes de cultura (K_C) do capim-vetiver e do capim-tifton 85, foram obtidos diariamente ao longo de todo o desenvolvimento vegetativo das plantas e para cada valor de condutividade elétrica. No entanto, dada à grande variabilidade nos valores diários de K_C , optou-se por apresentar os resultados considerando-se os valores médios de K_C para três fases

de desenvolvimento vegetativo da cultura, descritas a seguir: Fase I, correspondente aos 10 primeiros dias após o corte; Fase II, período compreendido entre o décimo primeiro e vigésimo dia após o corte; e Fase III, período compreendido entre o vigésimo primeiro e trigésimo dia após o corte.

Para o cálculo de K_C (Equação 18) foram utilizados os valores de evapotranspiração da cultura (ET_C) e de evapotranspiração de referência (ET_0), conforme recomendações de Allen *et al.* (1998).

$$K_C = \frac{ET_C}{ET_0} \quad (18)$$

A evapotranspiração da cultura (ET_C) foi obtida por meio do balanço hídrico, conforme apresentado na Equação 1, já a ET_0 foi calculada utilizando-se o método de Penman-Monteith FAO 56 (Equação 2) (ALLEN *et al.*, 1998), o qual fornece a ET_0 de uma vegetação hipotética, com altura fixa de 0,12 m, resistência ao transporte de vapor d'água igual a $70 \text{ s}^{-1} \text{ m}$, e albedo de 0,23. Este método foi selecionado por ser preciso e amplamente utilizado em estudos relacionados à evapotranspiração.

As variáveis meteorológicas utilizadas na estimativa da ET_0 foram obtidas em estação meteorológica automática, instalada na área experimental. Os dados de temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e precipitação foram coletados diariamente, sendo tais valores submetidos ao *Software Reference Evapotranspiration Calculation* (REF-ET).

A partir dos dados de produção de matéria seca e dos teores de N, P e K nas plantas, foi calculada a capacidade de extração de cada nutriente/poluinte dos capins vetiver e tifton (Equação 19).

$$Ext_{N, P \text{ ou } K} = \frac{P \times T_{N, P \text{ ou } K}}{100} \quad (19)$$

em que,

$Ext_{N, P \text{ ou } K}$ - extração de N, P ou K dos capins vetiver ou tifton ($\text{g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$);

P - produtividade de matéria seca dos capins vetiver ou tifton ($\text{g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$);

$T_{N, P \text{ ou } K}$ - teor de N, P ou K na matéria seca dos capins vetiver ou tifton (dag kg^{-1}).

As análises de regressão foram realizadas separadamente para cada planta e para cada corte, obtendo-se 21 modelos de estimativa do coeficiente de cultura e 7 modelos de estimativa da produtividade de biomassa vegetal aérea, e da extração de nitrogênio, potássio e fósforo em função da condutividade elétrica da solução nutritiva, sendo considerado satisfatórios os ajustes

que apresentaram comportamento biológico explicável e significância mínima de 10% para os coeficientes. Os parâmetros dos modelos obtidos para os diferentes cortes da parte aérea das plantas foram considerados variáveis dependentes e submetidos à análise de agrupamento por otimização de Tocher, para determinar quais cortes possuíam modelos similares. As análises de regressão e de agrupamento foram realizadas utilizando o programa estatístico *SAEG*[®].

4.2. Validação dos modelos obtidos em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário

Para validação dos modelos desenvolvidos, foram utilizados dados provenientes de dois SACs-EHSS, um cultivado com capim-vetiver e outro com capim-tifton 85, ambos utilizados no tratamento de esgoto sanitário, sistemas que foram denominados, neste trabalho como "escala plena". Os sistemas estão localizados na Área Experimental de Tratamento de Resíduos Urbanos (AETRU) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. As coordenadas geográficas do local correspondem à latitude 20°46'20" S e longitude 42°52'19" W, com altitude média de 677 m.

O esgoto sanitário utilizado no experimento foi proveniente do Condomínio Bosque Acamari, coletado na rede de esgotamento do SAAE e bombeado para o local do experimento, onde era armazenado em caixas de fibra de vidro para posterior distribuição nos SACs-EHSS. Nos reservatórios ocorria a sedimentação dos sólidos e, conseqüentemente, tratamento primário do esgoto sanitário.

Os SACs-EHSS, em operação desde agosto de 2014, foram construídos em paralelo, com fundo concretado e laterais em alvenaria recobertos com filme plástico de 150 micras de espessura, utilizado em cobertura de estufas agrícolas. Os sistemas possuem as seguintes dimensões: 4,0 m de comprimento, 1,0 m de largura e 0,4 m de profundidade, com fundo nivelado. O meio suporte é constituído por brita gnáissica "número 0" (camada de 0,3 m), sendo as mudas dos capins vetiver e tifton transplantadas com densidade de plantio de 12 propágulos por m². Ao longo dos SACs-EHSS, foram instalados tubos de PVC (40 mm) distanciados a cada 1,0 m e cravados verticalmente no meio suporte para possibilitar a coleta do esgoto sanitário em tratamento (Figura 6).

Os SACs-EHSS foram alimentados com uma vazão média igual a 0,22 m³ d⁻¹, resultando em uma taxa de carregamento orgânico (TCO) de, aproximadamente, 100 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO e tempo de detenção hidráulica de 2,0 dias. O controle da vazão foi realizado manualmente, com auxílio de torneiras plásticas.



Figura 6. SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário.

Para realização do balanço hídrico nos SACs-EHSS, foram instaladas caixas d'água de polietileno, com capacidade de 350 L para armazenamento do afluente, e caixas de 500 L, para coleta do efluente. As medições dos volumes afluente e efluente aos SACs-EHSS eram realizadas diariamente às 9:00 h da manhã. Paralelamente, media-se a precipitação por meio de um pluviômetro instalado próximo ao experimento, tornando possível o cálculo da evapotranspiração da cultura, utilizando-se a Equação 1.

Os cortes da parte aérea das plantas foram realizados de 30 em 30 dias, sendo o primeiro corte realizado em 2 de maio e o último em 2 de novembro, totalizando 7 cortes. Para avaliar a influência da CE no desenvolvimento vegetativo das plantas ao longo dos SACs-EHSS, esses foram divididos em quatro partes iguais, resultando em uma área de amostragem igual a 1 m² na qual era determinada a produtividade de biomassa vegetal aérea e a capacidade de extração dos nutrientes/poluentes, seguindo-se a mesma metodologia descrita anteriormente para os protótipos de SACs-EHSS.

Os valores de CE foram obtidos para o esgoto sanitário afluente, pontos intermediários dos SACs-EHSS e efluente do sistema, sendo as determinações realizadas a cada 2 dias. A amostragem do afluente dos sistemas foi realizada quinzenalmente, durante o período de monitoramento dos SACs-EHSS, sendo determinados a demanda bioquímica de oxigênio (BDO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo total (P) e potássio total (K). As análises laboratoriais foram realizadas no Laboratório de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em conformidade com as recomendações do *Standard methods for the examination of water and wastewater* (APHA, 2012). A DBO foi obtida pela quantificação do oxigênio dissolvido pelo método iodométrico

(processo Winkler), com incubação das amostras em câmara de incubação, a 20 °C, por 5 dias. O nitrogênio total foi quantificado pelo método micro-Kjeldahl com adição de ácido salicílico, visando a conversão de todo o nitrogênio presente em amônio e, posteriormente, em amônia. O fósforo, potássio total e sódio, foram quantificados após a digestão nítrico-perclórico das amostras, utilizando-se espectrofotômetro e fotômetro de chama.

Na Tabela 3, estão apresentados os valores médios de demanda bioquímica de oxigênio, nitrogênio total Kjeldahl, fósforo, potássio e sódio do esgoto sanitário afluente aos SACs-EHSS cultivados com os capins vetiver e tifton 85, ao longo do período experimental.

Tabela 3. Valores médios de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrogênio total Kjeldahl (NTK), fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na) no esgoto sanitário afluente aos SACs-EHSS durante o período de condução do experimento.

CORTES	DBO	NTK	P	K	Na
	----- (mg L ⁻¹) -----				
02/05	211 ± 19	62 ± 5,0	7,0 ± 0,4	7,0 ± 2,0	34 ± 3,0
02/06	212 ± 48	71 ± 6,0	8,0 ± 0,1	11 ± 2,0	41 ± 11
02/07	154 ± 36	71 ± 2,0	9,0 ± 1,0	13 ± 1,0	47 ± 6,0
02/08	151 ± 39	65 ± 1,0	7,0 ± 0,3	12 ± 2,0	32 ± 3,0
02/09	138 ± 32	82 ± 11	9,0 ± 1,0	14 ± 2,0	45 ± 4,0
02/10	156 ± 12	90 ± 2,0	9,0 ± 2,0	11 ± 1,0	41 ± 1,0
02/11	133 ± 15	76 ± 1,0	9,0 ± 1,0	12 ± 1,0	41 ± 1,0

Para validar os modelos provenientes dos protótipos de SACs-EHSS, foram utilizados os valores de CE do esgoto sanitário em tratamento para estimar os valores de coeficiente de cultura, de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e de extração de nitrogênio, fósforo e potássio pelas plantas, ao longo do sistema de tratamento. Em seguida, plotaram-se os valores estimados conjuntamente com os valores reais obtidos, sendo os resultados submetidos à análise estatística descritiva para avaliação dos modelos desenvolvidos.

Em relação aos dados de K_C , esses foram agrupados conforme as fases da cultura, seguindo-se o mesmo procedimento adotado em relação aos obtidos ao se analisar os protótipos de SACs-EHSS. A comparação entre os valores de K_C obtidos no cultivo das plantas nos protótipos e das plantas cultivadas nos SACs-EHSS utilizados no tratamento do esgoto sanitário foi realizada utilizando-se o Teste t de *Student* (teste t), adotando-se o nível de 5% de significância.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho foram divididos em duas partes, a primeira contempla o experimento realizado nos protótipos de SACs-EHSS, em que as plantas foram cultivadas utilizando-se solução nutritiva, originando modelos de evapotranspiração da cultura, de produtividade de biomassa vegetal aérea e de extração de nutrientes pelas plantas. A segunda parte apresenta a validação dos modelos obtidos, a partir de dados provenientes de SACs-EHSS utilizados no tratando de esgoto sanitário.

5.1. Experimento em protótipos de SACs-EHSS

Durante o período experimental, dados de temperatura e umidade relativa do ar foram monitorados por meio de uma estação meteorológica automática, instalada próxima aos protótipos de SACs-EHSS, sendo apresentados, na Figura 7, os valores médios diários dessas variáveis para o período de monitoramento do experimento.

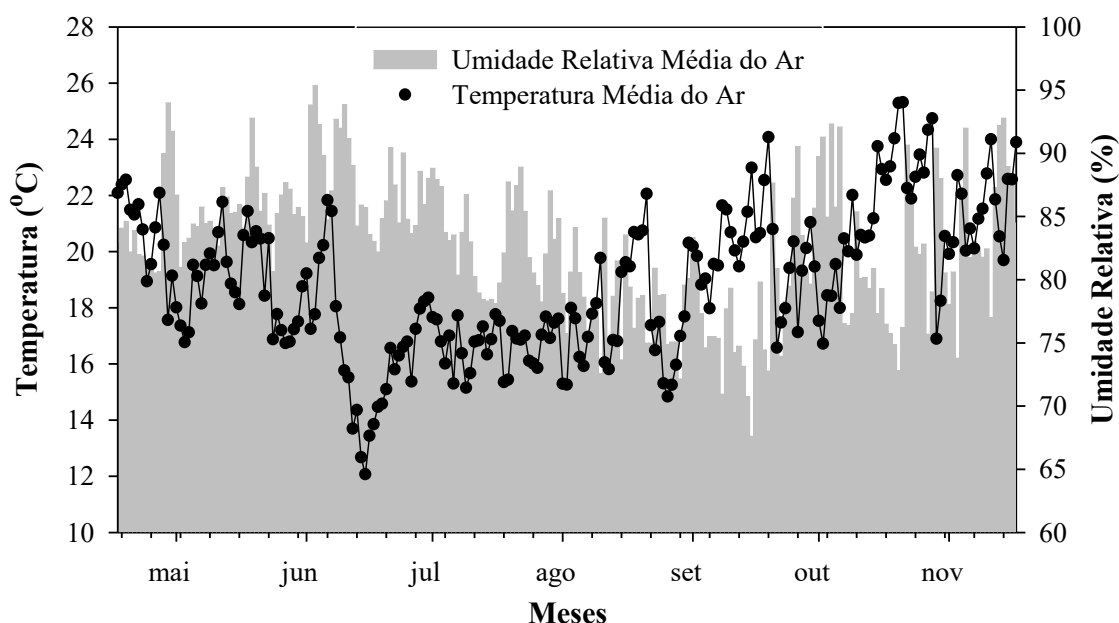


Figura 7. Valores médios diários de Temperatura e Umidade Relativa do ar ao longo do período experimental.

Do início do experimento até o dia 8 de junho, a temperatura média do ar variou em torno de 19,0 °C, a partir desta data houve decréscimo na temperatura, atingindo o valor mínimo de 12,1 °C no dia 15 de junho. Durante o inverno, meses de junho, julho e meados de agosto, a temperatura manteve-se em torno de 16,0 °C, correspondendo ao período mais frio de condução do experimento. Neste período, a baixa temperatura do ar afetou o desenvolvimento vegetativo

dos capins vetiver e tifton 85, resultando em menor produtividade de biomassa vegetal aérea e menores valores de evapotranspiração da cultura.

Ao final do mês de agosto e início setembro, observou-se tendência de aumento na temperatura do ar, no entanto, no dia 20 de setembro essa temperatura reduziu para 16,7 °C, mantendo-se mais baixa até o dia 17 de outubro. Este período coincidiu com o desenvolvimento vegetativo dos capins correspondente ao sexto corte da sua parte aérea, o que comprometeu sua produtividade de matéria seca, conforme será apresentado posteriormente.

Em relação à umidade relativa do ar, os menores valores foram verificados durante o mês de setembro, sendo o valor mínimo igual a 67,6% ocorrido no dia 15 de setembro. Já os valores máximos ocorreram no mês de junho, sendo o valor máximo igual a 95,4%, observado no dia 3 de junho.

Na Figura 8 estão apresentados valores diários de evapotranspiração de referência (ET_0), calculados utilizando-se o método de Penman-Monteith FAO 56, além de dados diários de precipitação no local de condução do experimento.

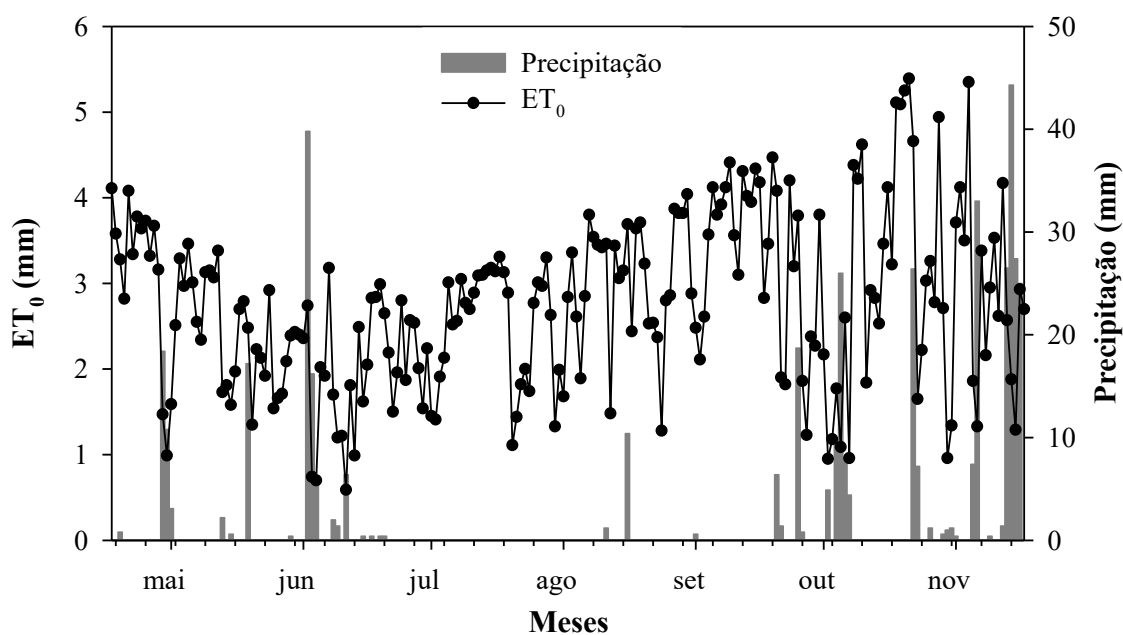


Figura 8. Valores diários de Evapotranspiração de Referência (ET_0) e Precipitação obtidos durante o período experimental.

Os menores valores de ET_0 foram obtidos ao final do mês de maio até o início do mês de julho, sendo o valor mínimo igual a 0,6 mm, verificado no dia 11 de junho. O valor máximo de ET_0 observado durante o período experimental foi de 5,4 mm, tendo ocorrido no dia 21 de outubro, sendo este o mês que apresentou os maiores valores de ET_0 , apesar da variabilidade

observada, consequência dos períodos nublados que favoreceram a baixa incidência da radiação solar sobre a superfície.

Durante o período experimental, foram contabilizados 45 eventos de chuva no local do experimento, sendo a maior lâmina igual a 44,3 mm, ocorrido no dia 14 de novembro, mês caracterizado como o início do período chuvoso na região. A lâmina total precipitada foi de 423 mm nos 7 meses de experimento. As grandes lâminas de chuva verificadas em alguns dias desse período experimental não prejudicaram as medições das variáveis utilizadas no balanço hídrico dos protótipos de SACs-EHSS, no entanto, contribuíram para a diluição da solução nutritiva, a qual tinha que ser totalmente substituída após os eventos de chuva.

5.1.1. Modelagem da ET_C dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS

A modelagem da ET_C dos capins vetiver e tifton foi realizada tendo-se por base o coeficiente de cultura (K_C) das referidas plantas, uma vez que a evapotranspiração de referência (ET_0), deverá ser obtida para a localidade que se deseja estimar os valores de ET_C . Para determinação dos valores de K_C , os estádios de desenvolvimento vegetativo das plantas foram divididos em três fases, as quais originaram equações de estimativa do K_C em função da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva.

Analisando os resultados obtidos em cada corte do capim-vetiver, verificou-se que, na Fase I, os valores de K_C não foram influenciados pela CE da solução nutritiva, podendo-se utilizar os valores médios de K_C para representar os diferentes valores de CE avaliados. Na Tabela 4, estão apresentados os valores médios de K_C obtidos em diferentes datas.

Tabela 4. Valores médios de K_C do capim-vetiver na Fase I de desenvolvimento vegetativo para diferentes datas.

	COEFICIENTE DE CULTURA (K_C)						
Data	26/04	26/05	26/06	26/07	26/08	26/09	26/10
Média	0,98	1,20	0,90	0,90	1,08	1,02	1,08

Na Fase I, que corresponde aos 10 primeiros dias após efetuado o corte da parte aérea das plantas, não houve grandes alterações nos valores de K_C para os diferentes valores de CE na solução nutritiva, pois, nesta fase, a evaporação é o principal componente da evapotranspiração, dada à pequena cobertura vegetal da superfície pelas plantas. Vários autores (KADLEC e WALLACE, 2009; PAPAEVANGELOU *et al.*, 2012; MILANI e TOSCANO, 2013) reconhecem que SACs-EHSS não vegetados apresentam menor variação na perda de água para a atmosfera em relação aos vegetados, pois não são influenciados pela transpiração das plantas,

a qual modifica-se ao longo do seu desenvolvimento vegetativo. Após o corte da parte aérea do capim-vetiver, a ausência da cobertura, possibilitou o aquecimento do substrato e da camada de água superficial, potencializando o processo evaporativo.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4, os valores de K_C para o capim-vetiver, na primeira fase de desenvolvimento vegetativo (Fase I), apresentaram pequena variabilidade, podendo ser utilizado um valor médio de K_C para estimativa da ET_C em SACs-EHSS cultivados com o respectivo capim, na faixa de CE, na solução nutritiva. O valor médio de K_C obtido nas diferentes datas foi de $1,03 \pm 0,11$, podendo esse valor ser utilizado nos meses frios e quentes do ano, já que na fase inicial de crescimento (Fase I), também não foi verificada grande influência do clima no coeficiente K_C do capim-vetiver, assim como da CE.

O valor de K_C próximo da unidade significa que a ET_C nos SACs-EHSS cultivados com o capim-vetiver na Fase I é semelhante a ET_0 calculada pelo método de Penman-Monteith. Segundo Borin *et al.* (2011), a evaporação em SACs-EHSS não cultivados pode ser equiparada à da ET_0 obtida pelo método de Penman-Monteith, corroborando os resultados obtidos neste trabalho, considerando-se a semelhança existente entre a Fase I de desenvolvimento da planta e as condições de exposição de SACs-EHSS não cultivados.

No processo de evaporação da água nos protótipos de SACs-EHSS, pode-se inferir que a salinidade da solução nutritiva, expressa em termos de CE, não influenciou o processo na primeira fase, visto que os valores de evaporação obtidos em soluções nutritivas contendo diferentes concentrações de sais foram semelhantes. Destarte, a perda de água em SACs-EHSS sem cultivo de plantas independe da concentração de sais na água residuária em tratamento, sendo a profundidade da lâmina d'água no sistema e as características do meio suporte, tais como o albedo, a porosidade, a granulometria e a condutividade térmica; além das variáveis meteorológicas, os principais condicionantes relacionados à evaporação.

A partir dos resultados de K_C obtidos para o capim-vetiver, na primeira fase de desenvolvimento vegetativo, infere-se que a evapotranspiração do referido capim, ao longo do comprimento de SACs-EHSS, não deve apresentar grande variação, podendo ser considerado constante para fins de dimensionamento e modelagem.

Na Figura 9, estão apresentados os gráficos de K_C em função da CE, nas diferentes datas de cultivo do capim-vetiver, nas fases de desenvolvimento vegetativo II e III, respectivamente.

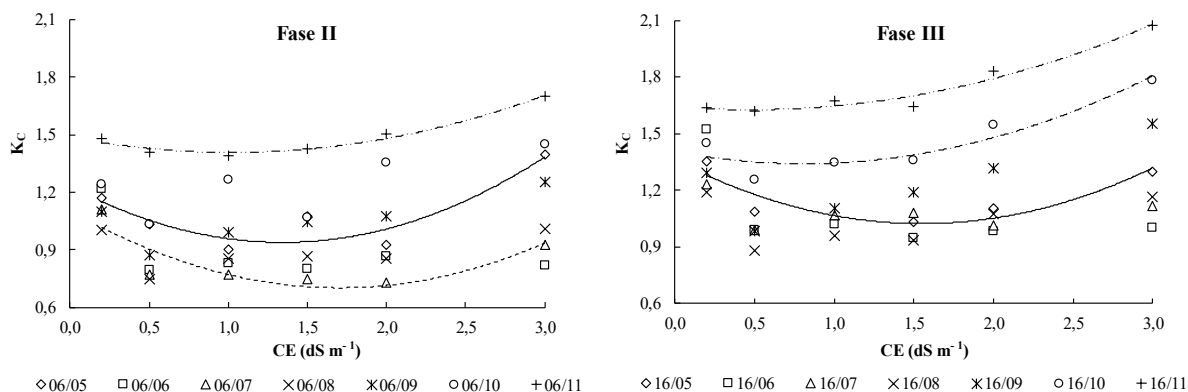


Figura 9. Coeficiente de cultura (K_C) em função da condutividade elétrica (CE), em diferentes datas do período de cultivo do capim-vetiver, nas Fases II e III de desenvolvimento vegetativo nos protótipos de SACs-EHSS.

De acordo com os dados apresentados na Figura 9, houve tendência de redução nos valores de K_C com o aumento da CE da solução nutritiva em relação a ambas as fases de desenvolvimento da planta, sendo mais pronunciada na Fase III, na qual as plantas apresentavam o maior desenvolvimento vegetativo. Após serem atingidos os valores mínimos, verificou-se aumento nos valores de K_C com o acréscimo da CE na solução nutritiva, comportamento observado, principalmente, nos primeiros meses de condução do experimento. Uma possível explicação para a variação observada é a menor produtividade de biomassa vegetal aérea nos protótipos submetidos à aplicação de soluções nutritivas de valores intermediários de CE, resultando em menores índices de área foliar e de sombreamento do meio suporte nos protótipos de SACs-EHSS, os quais eram constituídos, conforme já descrito, por brita gnáissica.

A produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver reduziu com o aumento da CE na solução nutritiva, tendo sido obtido o menor valor, no período de maio a agosto, no protótipo de SAC-EHSS submetido a CE de $1,0 \text{ dS m}^{-1}$. Após essa redução, houve aumento na produtividade de biomassa vegetal aérea nos protótipos alimentados com soluções nutritivas com CEs maiores que $1,0 \text{ dS m}^{-1}$. Nos protótipos de SACs-EHSS em que foram obtidas as maiores produtividades de biomassa vegetal aérea e, conseqüentemente, maior índice de área foliar, o sombreamento proporcionou redução na evaporação da água. Por outro lado, menores produtividades favoreceram maior exposição do substrato à radiação solar, contribuindo para aquecimento do meio, aumentando a temperatura da água e sua taxa evaporativa, corroborando a hipótese apresentada no parágrafo anterior.

Na Figura 10, verifica-se a diferença entre a cobertura foliar nos protótipos de SACs-EHSS alimentados com diferentes valores de CE na solução nutritiva.



Figura 10. Cobertura vegetal do capim-vetiver cultivado em solução nutritiva com valores de CE iguais a $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (b).

Além da redução na evaporação da água, o aumento no índice de área foliar do capim-vetiver, ocasionado pela maior produtividade de biomassa vegetal aérea, pode ter proporcionado maior sombreamento do meio, redução na velocidade do vento e arraste do vapor de água da superfície, saturação do ar entre as plantas e o meio suporte, reduzindo o efeito da evaporação nas unidades. Deste modo, verifica-se que a transpiração é a principal componente da evapotranspiração em SACs-EHSS cultivados com capim-vetiver, uma vez que maiores produtividades repercutiram em maiores valores de K_C . Essa constatação é corroborada por Kadlec e Wallace (2009), que afirmam que plantas cultivadas em sistemas alagados construídos com elevada disponibilidade de nutrientes tendem a apresentar maiores produtividades de biomassa vegetal aérea e, conseqüentemente, maiores valores de K_C .

Observou-se aumento nos valores de K_C com o estágio de desenvolvimento das plantas, sendo a Fase III a que apresentou os maiores valores. Com o desenvolvimento da cultura os valores de K_C tornaram-se maiores, destacando-se os meses de setembro, outubro e novembro, provavelmente devido às maiores temperaturas verificadas neste período. O maior valor de K_C para o capim-vetiver foi de 2,07, obtido no mês de novembro, na Fase III e CE igual a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, já o menor valor foi de 0,73, obtido no mês de julho, na Fase II e CE igual a $2,0 \text{ dS m}^{-1}$, demonstrando que a planta e as condições ambientais e climáticas do meio são os principais agentes controladores da ET_C , nos SACs-EHSS, conforme reportado por diversos autores (BORIN *et al.*, 2011; PEDESCOLL *et al.*, 2013; TOSCANO *et al.*, 2015; TUTTOLOMONDO *et al.*, 2015).

Na Tabela 5, estão apresentados os parâmetros médios estimados do polinômio de segundo grau, ajustado de K_C em função da CE da solução nutritiva, para as diferentes datas de

cultivo, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher para os parâmetros médios estimados.

Tabela 5. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados do polinômio de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustado de K_C em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as diferentes datas e fases de cultivo nos protótipos de SACs-EHSS.

FASE	GRUPO	DATA	A	B	C	R ²
II	G1	06/05	1,232	-0,436	0,162	0,826
		06/07	1,106	-0,474	0,139	0,741
		M. Comum	1,169	-0,455	0,151	0,8332
	G2	06/11	1,461	-0,071	0,034	0,978
III	G1	16/05	1,358	-0,434	0,140	0,811
		16/10	1,403	-0,156	0,097	0,890
		16/11	1,642	-0,066	0,071	0,960
	M. Comum	1,522	-0,111	0,084	0,9422	

Observa-se na Tabela 5 e na Figura 9 que as regressões relativas às datas de 06/06, 06/08, 06/09 e 06/10, para a Fase II de cultivo, e dos dias 16/06, 16/07, 16/08 e 16/09, para a Fase III, não estão apresentados, pois a variação da CE na solução nutritiva não influenciou, significativamente, a variação de K_C , sendo apresentado na Tabela 6 os valores médios de K_C para cada corte e fase de desenvolvimento vegetativo do capim-vetiver. Esses resultados são decorrentes da variabilidade na produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver em relação à CE na solução nutritiva.

Tabela 6. Valores médios de K_C do capim-vetiver para as diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo.

FASE	II				III			
Data	06/06	06/08	06/09	06/10	16/06	16/07	16/08	16/09
K_C	0,89	0,89	1,06	1,24	1,08	1,08	1,03	1,24

Analisando os resultados das análises de agrupamento relativos às Fase II e III, nota-se que os grupos formados a partir das datas de cultivo das plantas foram consistentes, em termos das condições climáticas verificadas durante o experimento, havendo diferenciação entre o período frio e quente, apesar de grande parte das regressões não terem sido significativas. Deste modo, dada à grande variabilidade, observada neste trabalho, nos valores de K_C do capim-vetiver, e a complexidade de determinação do coeficiente de cultura para os diversos valores de CE na água residuária a ser tratada em SACs-EHSS, a utilização de valores médios para

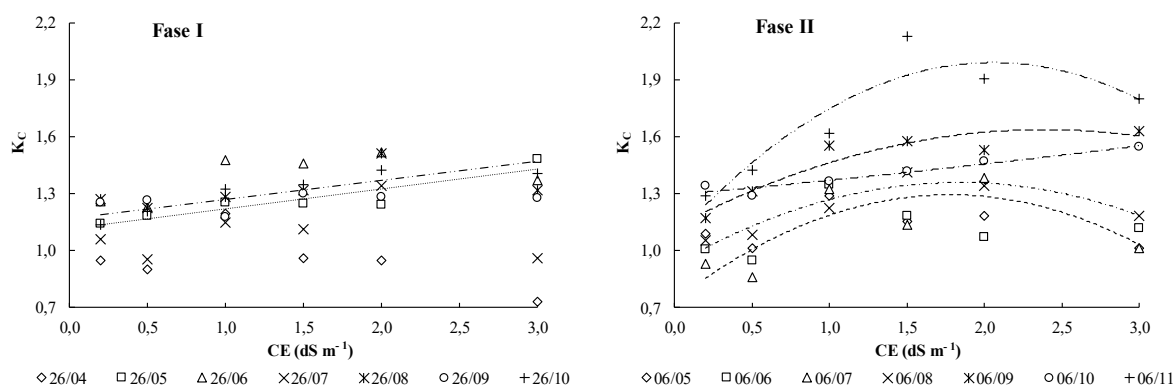
estimativa da ET_C , considerando-se as diversas fases de desenvolvimento da cultura e a época do ano, se justifica.

No que se refere à Fase II, a estimativa dos valores de K_C poderá ser realizada a partir dos valores médios obtidos em épocas frias e quentes do ano, conforme a análise de agrupamento realizada. Portanto, no período frio, o valor de K_C para o capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS poderá ser adotado como sendo de $0,95 \pm 0,11$ e, no período quente, de $1,36 \pm 0,18$. Em relação à Fase III, os valores médios de K_C nos períodos frio e quente são de $1,12 \pm 0,08$ e $1,60 \pm 0,20$, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, a variação da evapotranspiração do capim-vetiver ao longo dos SACs-EHSS, devido à alteração na CE da água residuária em tratamento, pode ser considerada insignificante para todas as fases de desenvolvimento vegetativo da cultura, principalmente em sistemas que apresentem pequena variação na produtividade de biomassa vegetal aérea ao longo do seu comprimento.

Não foram encontrados, na literatura consultada, valores de K_C para o capim-vetiver, apenas valores de lâmina evapotranspirada quando cultivados em sistemas alagados construídos. Toscano *et al.* (2015) obtiveram um valor médio de ET_C de $7,1 \text{ mm d}^{-1}$, em SACs-EHSS cultivados com capim-vetiver na Sicília, sul da Itália. Segundo os autores, os maiores valores de ET_C foram observados durante o verão, e os menores durante o inverno. Já Jesus (2016), avaliando o tratamento de esgoto sanitário em SACs-EHSS cultivados com capim-vetiver, em Viçosa-MG, encontrou nos períodos de inverno e primavera valores de ET_C de $9,6$ e $11,9 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente. Para efeito de comparação, neste trabalho foram encontrados valores máximos de $8,6 \text{ mm d}^{-1}$ durante a época mais quente do ano, e de $4,6 \text{ mm d}^{-1}$, no período de menores temperaturas registradas no monitoramento.

O capim-tifton 85 cultivado nos protótipos de SACs-EHSS apresentou comportamento distinto do capim-vetiver, sendo apresentado, na Figura 11, os gráficos de K_C em função da CE na solução nutritiva, para as diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo.



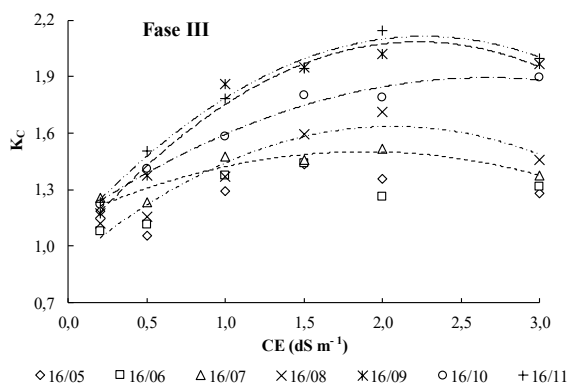


Figura 11. Coeficiente de cultura (K_C) em função da condutividade elétrica (CE), nas diferentes datas e nas Fases I, II e III de desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85 cultivado nos protótipos de SACs-EHSS.

Verifica-se na Figura 11, que os valores de K_C na Fase I não apresentaram grande variação com o aumento da CE da solução nutritiva, uma vez que as plantas estavam iniciando o desenvolvimento vegetativo logo após o corte. Em relação às Fases II e III observa-se que os valores de K_C apresentaram comportamento quadrático em função da CE, refletindo a mesma tendência da produtividade de biomassa vegetal aérea. Cogo (2009), estudando o crescimento, a produtividade e o consumo de solução nutritiva em diferentes concentrações pelo tomateiro cultivado em casca de arroz *in natura*, encontrou relação polinomial entre CE da solução nutritiva e a transpiração, no cultivo de primavera-verão, com tendência de redução nos valores de ET_C com aumento da CE.

O capim-tifton 85 se ramifica, alastrando-se por toda a extensão do SAC e cobrindo a superfície do meio suporte, independentemente da produtividade de biomassa vegetal aérea, como foi observado durante o experimento (Figura 12).

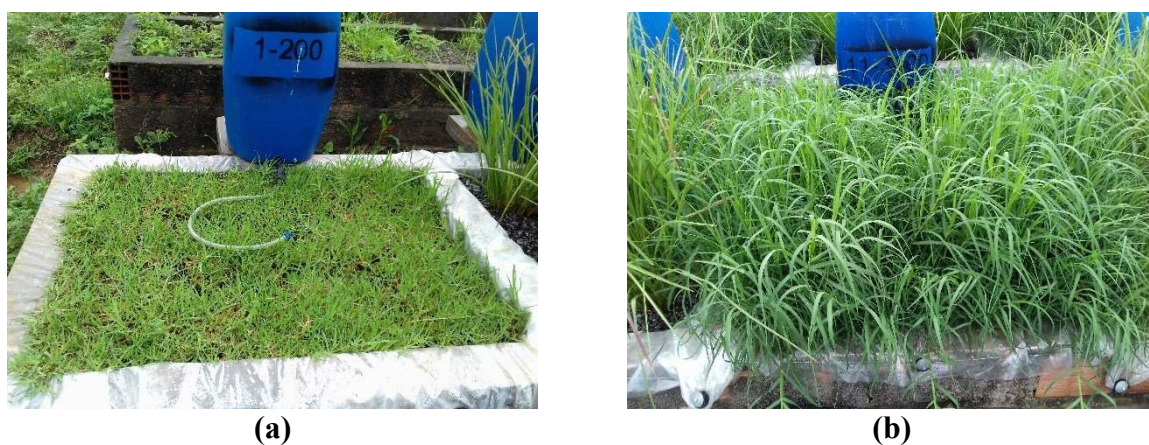


Figura 12. Cobertura vegetal em protótipos de SACs-EHSS cultivados com capim-tifton 85 e alimentados com solução nutritiva de CE $0,2 \text{ dS m}^{-1}$ (a) e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$ (b).

Deste modo, acredita-se que a menor exposição do substrato à radiação solar propiciou redução na evaporação da água. Em compensação, a maior cobertura da superfície proporcionada pelo capim-tifton 85 contribuiu para o aumento na transpiração das plantas, superando a redução na taxa evaporativa, proporcionada pelo sombreamento. Esse comportamento diferenciado em relação ao capim-vetiver repercutiu, também, nos valores de K_C , conforme observado nas diferentes fases de desenvolvimento vegetativo, em que os valores de K_C do capim-tifton 85 foram superiores ao do capim-vetiver.

Considerando as diversas datas de desenvolvimento da planta, constata-se que os menores valores de CE resultaram em valores de K_C mais próximos, os quais foram distanciando à medida que a CE se tornou maior. Esse comportamento está mais evidente na Fase III, estando relacionado à produtividade de biomassa vegetal aérea, a qual aumentou com os valores de CE até um certo limite. A partir de valores 1,5 ou 2,0 dS m⁻¹, verificou-se tendência de estabilização ou até mesmo declínio nos valores de K_C com aumento da CE, o que pode estar relacionado ao potencial osmótico da solução nutritiva, que diminui com o aumento na concentração de solutos, tornando a água menos disponível à absorção pelas plantas.

De modo semelhante ao ocorrido com o capim-vetiver, houve aumento nos valores de K_C com o estágio de desenvolvimento das plantas, destacando-se os meses de setembro e novembro, provavelmente devido às maiores temperaturas verificadas neste período. O maior valor de K_C para o capim-tifton foi de 2,15, obtido no mês de novembro, na Fase III, em solução nutritiva de CE de 2,0 dS m⁻¹, enquanto o menor valor foi de 0,73, obtido no mês de maio, na Fase I, e CE de 3,0 dS m⁻¹.

Jesus (2016), no município de Viçosa-MG, verificou que os valores de ET_C do capim-tifton 85 cultivados em SACs-EHSS permaneceram entre 6,8 e 8,3 mm d⁻¹, no período compreendido entre o inverno e a primavera. Já Pinto *et al.* (2007), avaliando a evapotranspiração em sistemas alagados construídos cultivados com capim-tifton 85, na mesma localidade, obtiveram valores de K_C entre 2,5 e 3,8, valor muito superior ao reportado por Santana *et al.* (2016), que é 1,07, quando cultivado em solo para fins de pastagem. Sanches *et al.* (2017), avaliando o consumo de água de forrageiras tropicais no período de formação de pastagem, observaram aumento nos valores de K_C com o desenvolvimento vegetativo da planta, sendo os valores mínimo, médio e máximo iguais a 0,68; 0,99 e 1,2, respectivamente. De acordo com essas informações e considerando os resultados obtidos neste trabalho, pode-se inferir que os valores de K_C do capim-tifton 85, quando cultivado em sistemas alagados construídos, são superiores aos valores observados em áreas de pastagem.

Na Tabela 7, estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro e segundo grau, ajustados de K_C em função da CE da solução nutritiva, para as diferentes datas de desenvolvimento da planta, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher para os parâmetros médios estimados.

Tabela 7. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro e segundo graus ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de K_C em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as diferentes datas e fases de desenvolvimento do capim-tifton 85 nos protótipos de SACs-EHSS.

FASE	GRUPO	DATA	A	B	C	R ²
I	G1	26/05	1,114	0,105	---	0,837
		26/10	1,170	0,099	---	0,797
		M. Comum	1,142	0,102	---	0,9515
II	G1	06/07	0,738	0,625	-0,176	0,658
		06/08	0,926	0,471	-0,128	0,892
		06/09	1,122	0,431	-0,090	0,884
		M. Comum	0,929	0,509	-0,131	0,927
	G2	06/10	1,294	0,072	0,005	0,926
	G3	06/11	1,070	0,895	-0,218	0,854
III	G1	16/07	1,143	0,380	-0,101	0,839
		16/10	1,129	0,573	-0,107	0,979
		M. Comum	1,136	0,477	-0,104	0,989
	G2	16/08	0,911	0,702	-0,170	0,920
		16/09	0,990	0,985	-0,221	0,972
	G3	16/11	1,068	0,923	-0,204	0,990
	M. Comum	1,029	0,954	-0,212	0,995	

Analisando-se os resultados obtidos na Fase I, observa-se que os valores de K_C aumentaram de forma linear com a CE na solução nutritiva, no entanto, esta variação foi muito pequena, de modo que, na maioria das datas, as regressões não estão apresentadas, pois a variação da CE da solução nutritiva não influenciou, significativamente, o valor de K_C . Além disso, os modelos obtidos para o período frio e quente foram agrupados em um modelo comum, dada à pequena variabilidade nos valores de K_C . Na Tabela 8 estão apresentados os valores médios de K_C para cada data e fase de desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85, aos quais não foi possível o ajuste de um modelo de regressão.

Considerando os resultados obtidos de K_C para o capim-tifton na Fase I de seu cultivo, a estimativa da ET_C em SACs-EHSS poderá ser realizada utilizando-se o valor médio de $1,17 \pm 0,15$, independentemente da CE da solução nutritiva e da época do ano. Conforme

discutido anteriormente, a baixa cobertura vegetal na superfície dos SACs-EHSS é a principal responsável pela pequena variação observada nos valores de K_C , logo, a evapotranspiração ao longo do comprimento do sistema de tratamento pode ser considerada constante.

Tabela 8. Valores médios de K_C do capim-tifton 85 para as diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo em protótipos de SAC-EHSS.

FASE	I					II		III	
Data	26/04	26/06	26/07	26/08	26/09	06/05	06/06	16/05	16/06
K_C	0,95	1,00	1,09	1,32	1,26	1,12	1,11	1,27	1,26

As análises de agrupamento apresentadas na Tabela 7 possibilita a subdivisão dos grupos formados em período frio e quente, tendo-se por base a temperatura média do ar. Na Fase II, tem-se o grupo 1, representativo de um período mais frio, e os grupos 2 e 3, representando um período quente. Já na Fase III, não se observou sequência na formação dos grupos em relação às datas de desenvolvimento das plantas, principalmente em relação à data de 16/10, na qual os valores de K_C foram inferiores ao obtido no dia 16/09. Este resultado pode ser explicado pelo decréscimo na temperatura do ar, ocorrido no período, conforme discutido anteriormente e apresentado na Figura 7.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que a estimativa da ET_C em SACs-EHSS cultivados com capim-tifton 85 poderá ser realizada utilizando-se os modelos obtidos pela análise de agrupamento para as Fase II e III, devendo ser considerado as condições climáticas do local e a CE na água residuária a ser tratada.

A condição climática do local deverá, nesse caso, ser expressa em termos da ET_0 , determinada pelo método de Penman-Monteith FAO 56 (ALLEN *et al.*, 1998), já a CE na água residuária em tratamento deverá ser obtida ao longo do comprimento do SAC-EHSS, podendo apresentar aumento ou redução nos seus valores, dependendo das características da água residuária e do sistema de tratamento. Ressalva-se que águas residuárias com elevado desbalanceamento nutricional, nas quais elevados valores de CE sejam devidos à presença de íons não essenciais às plantas, como por exemplo o sódio, não estão contempladas pelos modelos obtidos neste trabalho, devendo ser utilizado algum outro método de estimativa da ET_C das plantas cultivadas nos SACs-EHSS, receptores desse tipo de afluente.

Segundo Drexler *et al.* (2004) e Xu *et al.* (2011), estimativas da ET_C em SACs-EHSS, a partir de valores adequados de K_C , podem proporcionar excelentes resultados, desde que as condições climáticas e os métodos utilizados para estimativa da ET_0 sejam semelhantes. Diversos estudos avaliaram a variação de K_C de plantas cultivadas em SACs ao longo do período

de um ano, sendo os resultados condizentes com os obtidos neste trabalho. Anda *et al.* (2014), estudando a evapotranspiração do caniço (*Phragmites australis*) em SACs, obtiveram menores valores de K_C nos meses mais frios do ano, enquanto os maiores valores foram observados nos meses mais quentes. Segundo os autores, as variações climáticas durante o ano, notadamente temperatura, são as responsáveis pelas diferenças encontradas nos valores de K_C . De acordo com Toscano *et al.* (2015), os valores da K_C de plantas cultivadas em SACs, aumentam gradualmente durante o verão, período em que as plantas apresentam o maior desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, maior índice de área foliar. Durante o inverno, os menores valores são decorrentes das baixas temperaturas nesse período.

Conforme observado neste trabalho, a produtividade de matéria seca da parte aérea de plantas cultivadas em SACs-EHSS está diretamente relacionada com a ET_C e com a remoção de nutrientes/poluentes desses sistemas. De acordo com Xu *et al.* (2011), existe correlação positiva entre a evapotranspiração da cultura e a produtividade de biomassa vegetal aérea, deste modo, quanto maior a produtividade, maior será a ET_C , devido a maior área foliar exposta à radiação solar. Segundo Chazarenc *et al.* (2010), uma técnica utilizada para aumentar a eficiência de remoção de nutrientes/poluentes de SACs-EHSS em países de clima tropical, consiste em construí-los em locais com incidência direta da radiação solar, possibilitando maior desenvolvimento vegetativo e, conseqüentemente, maiores valores de ET_C .

Visando comparar a evapotranspiração dos capins vetiver e tifton85, foram somados os valores diários de ET_C para cada CE da solução nutritiva, obtendo-se a lâmina total evapotranspirada durante todo o período experimental (Tabela 9).

Tabela 9. Valores totais de ET_C dos capins vetiver e tifton 85 em função da CE da solução nutritiva durante o período de cultivo nos protótipos de SACs-EHSS.

CE (dS m ⁻¹)	ET_C TOTAL (mm)	
	Capim-Vetiver	Capim-Tifton 85
0,2	712	668
0,5	588	687
1,0	616	820
1,5	620	841
2,0	647	862
3,0	773	813

De acordo com os dados apresentados na Tabela 9, verifica-se que, no geral, o capim-tifton 85 apresentou maior ET_C , quando comparado ao capim-vetiver. Os maiores valores de

ET_C nos sistemas cultivados com capim-tifton 85 são decorrentes da sua maior produtividade de biomassa vegetal aérea, a qual proporciona maior perda de água pelo processo transpirativo.

O comportamento contrário para solução nutritiva de CE de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, está, aparentemente, associado ao maior desenvolvimento do capim-vetiver em relação ao capim-tifton 85, quando cultivado em ambientes cujo meio poroso seja saturado com solução nutritiva de baixa salinidade tal como a de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$. Jesus (2016) observou menores valores de ET_C do capim-tifton 85, em relação ao capim-vetiver, quando cultivados em SACs-EHSS tratando esgoto sanitário com CE de $0,87 \text{ dS m}^{-1}$. Segundo o autor, os maiores valores de ET_C do capim-vetiver estão relacionados à sua maior área foliar, decorrente da maior produtividade, corroborando o resultado obtido neste trabalho.

5.1.2. Modelagem da produtividade de biomassa vegetal aérea dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS

Na Figura 13, estão apresentadas as curvas de produtividade dos capins vetiver e tifton em função da condutividade elétrica da solução nutritiva, para as 7 datas de cortes realizados nas plantas durante o período experimental.

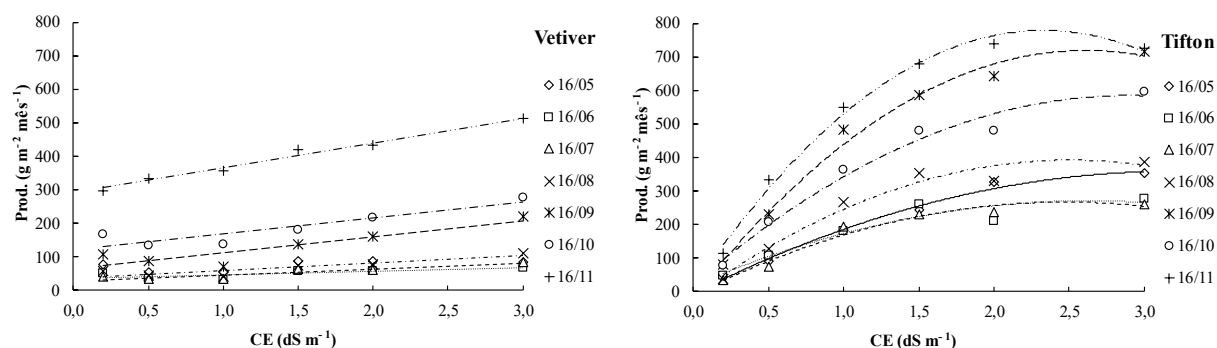


Figura 13. Curvas de produtividade (Prod.) de matéria seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85 em função da condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva de alimentação dos diferentes protótipos de SACs-EHSS.

A produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver, em todas as datas de corte (à exceção da de 16/11), reduziu com o aumento da CE na solução nutritiva ($0,2$ a $1,0 \text{ dS m}^{-1}$). Após essa redução, houve aumento na produtividade de biomassa vegetal aérea para as soluções nutritivas com CEs maiores que $1,0 \text{ dS m}^{-1}$. A redução média na produtividade para as CEs de $0,2$ a $1,0 \text{ dS m}^{-1}$ é considerada pequena em relação à variação média total, além disso, não foi observado nenhum fator responsável por essa variação, portanto, atribui-se esse comportamento de variação ao acaso (presença dos efeitos não controlados).

O aumento na produtividade de biomassa vegetal aérea dos capins quando submetidos aos maiores valores de CE na solução nutritiva, pode estar relacionado ao aumento na disponibilidade de nutrientes no meio e, conseqüentemente, sua maior absorção pelas raízes das plantas. Diversos autores (MATOS *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2010; AMORIM *et al.*, 2015; AVELAR *et al.*, 2016) observaram aumento na produtividade de biomassa vegetal aérea de plantas cultivadas em SACs-EHSS, em consequência da aplicação de maiores taxas de carregamento orgânico, a qual proporciona maior disponibilidade de nutrientes no meio.

A variação na produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver em função da variação na CE da solução nutritiva foi menor que a observada no capim-tifton 85, refletindo maior resiliência desta espécie em relação às mudanças no meio. Observa-se que a produtividade de biomassa vegetal aérea aumentou, de forma linear, com o aumento na CE dessa solução, não demonstrando nenhuma estabilização ou decréscimo da produtividade em relação aos maiores valores de CE. Essa tendência evidencia que o capim-vetiver, apesar de apresentar menor produtividade de matéria seca da parte aérea, tolera ambientes mais salinos, quando comparado ao capim-tifton 85, podendo ser indicado para o tratamento de águas residuárias com elevados valores de CE. Há de se registrar, no entanto, que mesmo sendo mais sensível à salinidade, o capim-tifton 85 apresenta melhor aproveitamento dos nutrientes contidos na solução.

A produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 aumentou de forma quadrática em relação à CE da solução nutritiva, apresentando decréscimo nos maiores valores de CE. O aumento na salinidade da solução nutritiva, expressa em termos de CE, pode ter contribuído para a intoxicação das plantas por absorverem nutrientes em quantidades superiores às necessárias, apesar de não terem sido verificados sintomas de toxicidade nas plantas, durante seu tempo de cultivo nos protótipos. As mais altas produtividades de biomassa vegetal seca da parte aérea foram obtidas em cultivos efetuados com soluções nutritivas de CE variando de 2,0 a 2,5 dS m⁻¹, sendo as maiores variações observadas no período mais quente do ano. Essas evidências também foram observadas em relação aos valores de K_C , havendo decréscimo do seu valor após determinados valores de CE.

Na Tabela 10, estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau, ajustado de produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver em função da CE da solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher para os parâmetros médios estimados.

Tabela 10. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as respectivas datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	R ²
G1	16/06	35,35	10,51	0,560
	16/07	28,31	17,86	0,832
	16/08	35,95	22,45	0,776
	16/09	65,10	47,41	0,799
	16/10	121,05	47,61	0,814
	M. Comum	57,15	29,17	0,801
G2	16/11	290,30	74,70	0,984

De acordo com os dados apresentados na Tabela 10, a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver pode ser estimada utilizando-se apenas dois modelos, um modelo comum, proveniente do agrupamento dos cortes dos meses de junho, julho, agosto, setembro e outubro, e um segundo modelo representado pelo corte de novembro. Esses resultados repercutem a pequena variabilidade que a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver apresentou no decorrer do ano, principalmente, em função da temperatura do ar. Desse modo, a estimativa da produtividade de matéria seca da parte aérea nos períodos mais frios poderá ser realizada utilizando-se o modelo comum do grupo 1; nos períodos mais quentes recomenda-se a utilização do modelo do grupo 2.

Observa-se que não houve nenhum modelo ajustado para a data de 16/05, pois a variação da CE da solução nutritiva não influenciou, significativamente, a variação da produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver neste período, sendo o valor médio calculado de $73,5 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$. A produtividade máxima de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver foi de $513,4 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, obtida no mês de novembro e CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, já a produtividade mínima foi de $333,7 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, obtida no mês de julho, e CE de $0,5 \text{ dS m}^{-1}$.

De acordo com Vieritz *et al.* (2003), a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver está em torno de $20 \text{ a } 40 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($166,7 \text{ a } 333,3 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$), mas em locais onde há irrigação esse valor pode chegar a $100 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($833,3 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$). Considerando-se as produtividades obtidas para valores de CE iguais a $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, tem-se uma produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS de $513,4 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ ($193,8 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ se considerado o valor médio dos 7 cortes efetuados), valor relativamente alto, quando comparado ao cultivo em solo. Ramos *et al.* (2017),

avaliando o tratamento de águas residuárias da suinocultura em sistemas alagados construídos cultivados com capim-vetiver, obtiveram produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea de $57,3 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, sendo o valor da CE da água residuária durante o período experimental de $3,03 \pm 0,60 \text{ dS m}^{-1}$. Ao cultivar o capim-vetiver em SACs verticais no período de inverno, utilizando solução de nitrato como afluente, Borges *et al.* (2016) verificaram produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea variando de $10,3$ a $13,6 \text{ t ha}^{-1}$, para um período de cultivo de 40 dias, que corresponde a uma variação de $772,5$ a $1020 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, valores muito superiores aos obtidos nesse trabalho. Jesus (2016), por sua vez, avaliando o desempenho do capim-vetiver no tratamento de esgoto sanitário em SACs-EHSS, obteve produtividade de matéria seca de $16,61 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($138,4 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$), no cultivo durante o inverno, e $35,59 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ($296,6 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$), no cultivo durante a primavera, valores esses condizentes com os obtidos neste trabalho.

A pequena variabilidade encontrada nos valores de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver em função da CE da solução nutritiva, demonstra a baixa eficiência desta planta quando cultivada em SACs utilizados no tratamento de águas residuárias contendo elevada concentração de nutrientes/poluentes, pois sua pequena produtividade irá resultar em baixa extração. Já em relação a águas residuárias mais diluídas, o capim-vetiver pode ser considerada uma planta promissora, uma vez que sua produtividade de matéria seca é superior à do capim-tifton 85 para valores de baixa CE na solução nutritiva, tais como a de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$. Ainda em relação a produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver, pode-se inferir que há pequena variação nessa variável, ao longo do comprimento dos SACs-EHSS, quando o efluente a ser tratado apresenta valores de CE compreendidos entre $0,2$ e $3,0 \text{ dS m}^{-1}$.

Na Tabela 11, estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau, ajustado de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 em função da CE da solução nutritiva, nas diferentes datas de corte, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher para os parâmetros médios estimados.

De acordo com a análise de agrupamento apresentada na Tabela 11, verifica-se a formação de três grupos, o grupo 1 formado pelas datas compreendidas entre os meses de maio a julho, coincidente com a época mais fria do ano, e conseqüentemente, menor produtividade das plantas. O grupo 2 pode ser caracterizado pela transição do período frio para o período quente, sendo constituído pelos meses de agosto e outubro. Apesar do agrupamento não seguir a seqüência dos meses, nota-se que outubro apresentou médias de temperatura do ar menores que o mês de setembro, explicando os resultados obtidos. Já o grupo 3, que agrupou datas em

que obtiveram maiores produtividades de matéria seca, composto pelos meses de setembro e novembro, representa, no período experimental, o mais quente e no qual há maior desenvolvimento vegetativo das plantas.

Tabela 11. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, para as respectivas datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	C	R ²
G1	16/05	-6,60	227,69	-35,46	0,992
	16/06	17,86	192,02	-36,49	0,912
	16/07	-9,83	223,78	-45,22	0,971
	M. Comum	0,47	214,50	-39,06	0,991
G2	16/08	-13,62	323,80	-64,60	0,965
	16/10	20,83	388,77	-67,02	0,978
	M. Comum	3,61	356,28	-65,81	0,973
G3	16/09	-15,91	562,81	-107,70	0,988
	16/11	14,25	656,41	-140,91	0,993
	M. Comum	-0,83	609,61	-124,30	0,992

A partir dos modelos comuns obtidos pelas análises de agrupamento pode-se estimar a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 cultivado em SACs-EHSS, considerando-se o período frio, quente e de transição. O desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85 foi altamente influenciado pela variação na temperatura do ar, assim como, pela variação da CE na solução nutritiva, no entanto, quando utilizado no tratamento de águas residuárias contendo elevada concentração de nutrientes, sua produtividade poderá reduzir, conforme observado na Figura 13, embora, ainda assim, permaneça bastante alta. Neste trabalho, a produtividade máxima do capim-tifton 85 foi obtida no corte efetuado no mês de novembro, sendo de $739,4 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ para o valor de CE de 2 dS m^{-1} , já a produtividade mínima foi de $353,24 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, observada no mês de julho, para a CE de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$.

Os modelos lineares e quadráticos ajustados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea em função da CE da solução nutritiva utilizada nos protótipos de SACs-EHSS, se mostraram adequados quando comparados aos ajustados para cultivos hidropônicos. Nesses sistemas de cultivo, a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea em função da CE da solução nutritiva, é comumente representado por modelos polinomiais quadráticos (COGO, 2009; GONDIM *et al.*, 2010; PORTELA *et al.*, 2012) e lineares (MACIEL *et al.*, 2012; PAULUS *et*

al., 2012; LIRA *et al.*, 2015), demonstrando a adequação desses modelos para representar o fenômeno em estudo.

Avelar *et al.* (2016) obtiveram um modelo polinomial quadrático de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea da *Mentha aquatica* em função da taxa de carregamento orgânico aplicada aos SACs, apresentado um ponto de máxima produtividade, e demonstrando que o aumento da carga orgânica aplicada poderiam resultar em redução de produtividade. Garcia *et al.* (2015) verificaram aumento linear da produtividade do capim-tifton 85 com maiores taxas de aplicação de esgoto sanitário, via fertirrigação. De acordo com os autores, estes resultados estão relacionados com o aporte de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, propiciado pelo aumento nas doses aplicadas de esgoto sanitário.

Matos *et al.* (2008) verificaram aumento polinomial quadrático na produtividade de matéria seca do capim-tifton 85 cultivado em SACs-EHSS receptores de maiores taxas de carregamento orgânico de águas residuárias de laticínios. Entretanto, valores superiores a 500 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO provocaram tendência de redução na produtividade de matéria seca desse capim, tendo sido a máxima produtividade de, aproximadamente, 15 t ha⁻¹, obtida aos 45 dias de cultivo do capim-tifton 85 (1000 g m⁻² mês⁻¹). Fia *et al.* (2011), avaliando a capacidade extratora do capim-tifton cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento da água residuária da suinocultura e submetidos a taxas de carregamento orgânico variando de 163 a 561 kg ha⁻¹ d⁻¹ de DBO, verificaram que a taxa de 327 kg ha⁻¹ d⁻¹ se mostrou mais adequada ao desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85, sendo que a produtividade média de matéria seca variou de 4,73 a 6,26 t ha⁻¹, após 60 dias de cultivo (236,5 a 313 g m⁻² mês⁻¹).

Garcia *et al.* (2015), obtiveram produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-tifton 85 variando de 0,62 a 2,26 t ha⁻¹ (62 a 226 g m⁻² mês⁻¹), em solo fertirrigado com esgoto sanitário, para um período de cultivo igual a 30 dias, de junho a agosto. Considerando o período de condições climáticas semelhantes, de maio a agosto, a produtividade foi próxima a observada neste trabalho, indicando a representatividade dos resultados obtidos em SACs-EHSS em escala de protótipo. Jesus (2016) obteve produtividade de matéria seca da parte aérea do capim-tifton 85, para o período de inverno e primavera de, respectivamente, 17,41 e 27,48 t ha⁻¹ ano⁻¹ (145,1 e 229 g m⁻² mês⁻¹). Considerando que o referido autor trabalhou com um período de cultivo de 30 dias e que o valor médio da CE do esgoto sanitário foi de 0,87 ± 0,65 dS m⁻¹, as variações observadas nos valores de produtividade estão condizentes com os resultados obtidos neste trabalho. Amorim *et al.* (2015), avaliando o desempenho do capim-tifton 85 no tratamento de água residuária de suinocultura, observaram redução na produtividade de matéria seca da parte aérea, em decorrência da diminuição na temperatura do

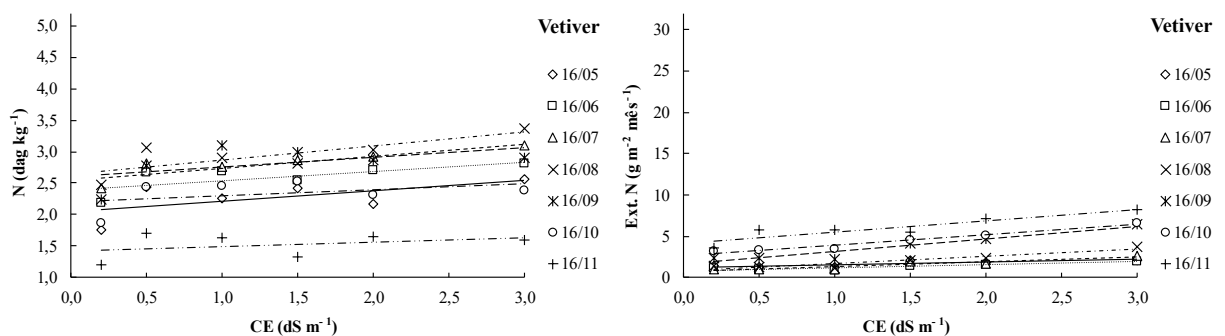
ar e da disponibilidade de nutrientes no meio. Esses autores obtiverem produtividade de matéria seca da parte aérea do capim-tifton 85 de $4,9 \text{ t ha}^{-1}$, para um período de cultivo de 32 dias ($460 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$).

De acordo com os resultados apresentados, pode-se esperar que a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea dos capins, ao longo do comprimento dos SACs-EHSS, aumente com o aumento da CE na água residuária em tratamento, de modo que o início do sistema apresentará os maiores valores de produtividade de biomassa vegetal aérea, devido às elevadas taxas de carregamento orgânico o qual é submetido. Entretanto, notadamente no que se refere ao capim-tifton 85, existe um limite para a taxa de carregamento orgânico. Ainda, pode-se observar que o clima é fator importante na produção de massa verde das culturas em SACs-EHSS.

5.1.3. Modelagem da capacidade de extração de nutrientes/poluentes dos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS

5.1.3.1. Nitrogênio (N)

A capacidade de extração de nutrientes/poluentes é função da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e do teor do nutriente no tecido vegetal da planta, sendo apresentado na Figura 14, o teor de nitrogênio no tecido vegetal dos capins vetiver e tifton 85 e suas respectivas capacidades de extração, em função da CE da solução nutritiva, para as 7 datas de corte avaliadas.



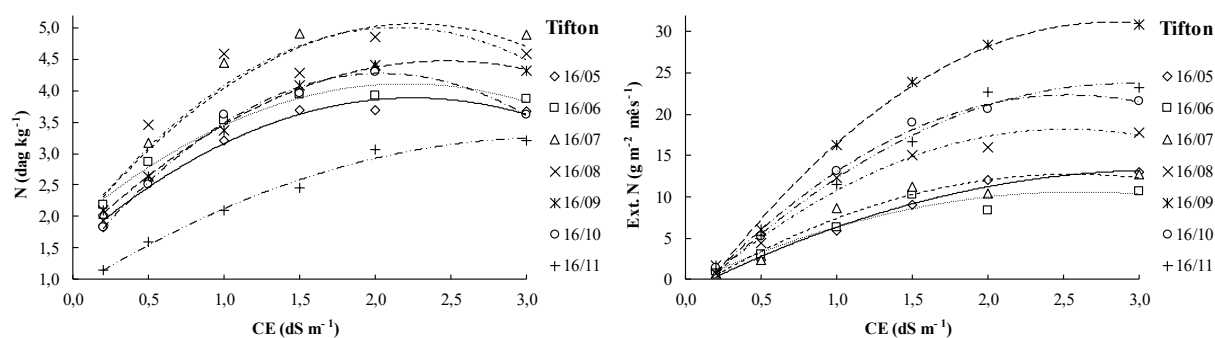


Figura 14. Teor de nitrogênio (N) no tecido vegetal e capacidade de extração de nitrogênio (Ext. N) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas em protótipos de SACs-EHSS.

De acordo com os resultados obtidos, constata-se que os teores de N no tecido vegetal do capim-vetiver são inferiores aos do capim-tifton 85, além disso, a variação no teor de N em função da CE da solução nutritiva apresenta comportamento linear, no que se refere ao capim-vetiver, e quadrático, para o capim-tifton 85. Isso demonstra a maior capacidade do capim-tifton 85 em acumular nitrogênio no tecido vegetal, característica importante para seleção de plantas a serem utilizadas em SACs-EHSS, onde se deseja maior capacidade de extração de nitrogênio do afluente a ser tratado.

Analisando-se as datas de corte dos capins, nota-se que os menores teores de nitrogênio no tecido vegetal dos capins vetiver e tifton 85 foram obtidos no mês de novembro, caracterizado como o mês de maior produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea em ambos os capins. Deste modo, pode-se inferir que os teores de nitrogênio no tecido vegetal tende a reduzir com aumento na produtividade, consequência do efeito de diluição comumente verificado em grande parte das plantas cultivadas em solo.

O teor máximo de N no tecido vegetal do capim-vetiver, observado neste trabalho, foi de $3,4 \text{ dag kg}^{-1}$, obtido no mês de agosto para a CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, enquanto o teor mínimo foi de $1,2 \text{ dag kg}^{-1}$, verificado no mês de novembro para a CE de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$. De acordo com Vieritz *et al.* (2003), o teor de nitrogênio no tecido vegetal do capim-vetiver pode variar entre $0,2$ a $2,5 \text{ dag kg}^{-1}$, sendo que concentrações acima de $2,0 \text{ dag kg}^{-1}$, o capim tende a apresentar o máximo crescimento. Ramos *et al.* (2017) obtiveram, para o capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS tratando água residuária da suinocultura, teor de nitrogênio de $1,96 \text{ dag kg}^{-1}$, para um período de cultivo de 30 dias. Borges *et al.* (2016) encontraram teor de $0,81 \text{ dag kg}^{-1}$ de N no tecido vegetal do capim-vetiver, valor muito inferior ao de $9,3 \text{ dag kg}^{-1}$ obtido por Jesus (2016) em SACs-EHSS tratando esgoto sanitário.

Em relação ao capim-tifton 85, o maior teor de N foi de 4,9 dag kg⁻¹, obtido no mês de julho, quando cultivado em solução nutritiva com CE de 1,5 dS m⁻¹, e o menor valor igual a 1,1 dag kg⁻¹, verificado no mês de novembro para CE de 0,2 dS m⁻¹. Matos *et al.* (2008) observaram aumento polinomial quadrático no teor de N no tecido vegetal aéreo do capim-tifton 85 com a aplicação de maiores taxas de carregamento orgânico, sendo encontrados teores de N variando de 2,9 a 4,0 dag kg⁻¹ na biomassa aérea do referido capim. Comportamento semelhante foi encontrado por Amorim *et al.* (2015), no qual verificou-se aumento nas concentrações de nitrogênio no tecido aéreo do capim-tifton 85 com o aumento da taxa de aplicação superficial de nutrientes, sendo os teores de N compreendidos entre 0,19 e 1,58 dag kg⁻¹. Fia *et al.* (2011) e Fia *et al.* (2014) obtiveram para o capim-tifton 85, teores de nitrogênio na biomassa vegetal aérea variando entre 2,73 e 3,50 dag kg⁻¹ e 4,31 e 4,68 dag kg⁻¹, respectivamente.

A extração de nitrogênio proporcionada pelo capim-vetiver apresentou o mesmo comportamento da produtividade e do teor de N no tecido vegetal, sendo apresentado na Tabela 12, os parâmetros médios estimados do polinômio de primeiro grau, ajustado de extração de N em função da CE para as diferentes datas de corte, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher.

Tabela 12. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de N pelo capim-vetiver (Ext. N) (g m⁻² mês⁻¹) em função da CE (dS m⁻¹), para as diferentes datas de corte quando cultivado nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	R ²
G1	16/05	1,209	0,333	0,671
	16/06	0,799	0,362	0,789
	16/07	0,663	0,618	0,888
	16/08	0,815	0,865	0,859
	16/09	1,569	1,540	0,910
	M. Comum	1,011	0,743	0,8848
G2	16/10	2,570	1,295	0,958
	16/11	4,094	1,390	0,831
	M. Comum	3,332	1,343	0,9588

A estimativa da capacidade de extração de nitrogênio pelo capim-vetiver pode ser realizada para períodos frios e quentes, a partir dos modelos comuns do grupo 1 e 2, respectivamente. Apesar da pequena variação na extração de N, comparando-se as diferentes datas de corte da parte aérea das plantas, verifica-se que os modelos ajustados aos dados obtidos nos meses mais frios e, conseqüentemente, de menor produtividade de biomassa aérea, foram

agrupados em um mesmo modelo, assim como, para os meses de maior produtividade, originando um modelo comum. Apesar do teor de N no tecido vegetal do capim-vetiver nos meses mais quentes ser inferior ao obtido nos meses mais frios, a maior produtividade de biomassa vegetal aérea obtida neste período, proporcionou maior extração de N pela planta, demonstrando que a produtividade é o fator mais importante a ser considerado no cálculo da capacidade de extração de nitrogênio pelo capim-vetiver. De acordo com Keizer-Vlek *et al.* (2014) a absorção de nutrientes pelas plantas é um importante aspecto na eficiência de remoção de nutrientes em SACs, sendo que a produtividade de biomassa vegetal aérea é mais importante do que o teor de nutrientes nos tecidos, na determinação da quantidade de nutrientes removidos pela absorção das plantas.

A máxima extração de N foi de $8,2 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, obtida no mês de novembro, para uma CE da solução nutritiva de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. Em contrapartida, o valor mínimo foi observado no mês de junho para uma CE igual a $1,0 \text{ dS m}^{-1}$, proporcionando uma extração de $0,8 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Borges *et al.* (2016) e Ramos *et al.* (2017) obtiveram, respectivamente, taxas de remoção de nitrogênio de $6,9$ e $1,2 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ pelo capim-vetiver. Jesus (2016) obteve taxas de extração de nitrogênio pelo capim-vetiver, para os períodos de inverno e primavera de, respectivamente, $17,4$ e $39,9 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, valores muito superiores aos obtidos neste trabalho. As elevadas taxas de extração de nitrogênio verificadas pelo citado autor estão relacionadas ao maior teor de N no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver.

Os resultados obtidos tornam evidente que o capim-vetiver não é uma espécie considerada indicada para ser cultivada em SACs-EHSS a serem utilizados no tratamento de águas residuárias ricas em nutrientes, devido à sua baixa capacidade de extração de nitrogênio. Entretanto, ao se comparar a extração de N dos capins vetiver e tifton 85, considerando-se dados obtidos para solução nutritiva de CE $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, constata-se a superioridade do capim-vetiver, confirmando sua vocação para cultivo em SACs-EHSS a serem utilizados no tratamento de águas residuárias contendo baixas concentrações de nutrientes, notadamente, nitrogênio.

Dada à pequena variação na extração de N pelo capim-vetiver com o aumento na CE da solução nutritiva aplicada, conclui-se que a extração de nitrogênio ao longo dos SACs-EHSS apresenta pouca variação, com tendência de aumento linear nos trechos com maiores valores de CE na água residuária em tratamento.

Na Tabela 13 estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau, ajustados de extração de N pelo capim-tifton 85 em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher. A extração de nitrogênio pelo capim-tifton 85 seguiu

o mesmo comportamento da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e do teor de N no tecido vegetal do referido capim.

Tabela 13. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de extração de N pelo capim-tifton 85 (Ext. N) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) da solução nutritiva, nas diferentes datas de corte dessas plantas, quando cultivadas em protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	C	R ²
G1	16/05	-1,497	9,301	-1,469	0,989
	16/06	-0,586	8,568	-1,644	0,925
	16/07	-1,634	11,223	-2,193	0,949
	M. Comum	-1,239	9,697	-1,769	0,982
G2	16/09	-4,082	25,004	-4,438	0,996
G3	16/08	-2,221	16,226	-3,225	0,982
	16/10	-2,925	19,926	-3,929	0,995
	16/11	-2,796	18,172	-3,113	0,989
	M. Comum	-2,647	18,108	-3,423	0,999

A análise de agrupamento dos modelos de extração de N do capim-tifton 85 em função da CE da solução nutritiva possibilitou a obtenção de três grupos independentes. O modelo comum do grupo 1 representa os meses frios, em que a extração de N é baixa, já o modelo comum do grupo 3 caracteriza os meses mais quentes e de maior desenvolvimento vegetativo da planta, apesar de não ter sido a época de maior capacidade de extração de N pela planta. O modelo proveniente da data de avaliação no mês de setembro, pertencente ao grupo 2, foi o que proporcionou a maior extração de N durante o período experimental, consequência do segundo período de maior produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea, porém de maior teor de nitrogênio no tecido vegetal do capim-tifton 85.

De acordo com os resultados apresentados, a capacidade de extração de N do capim-tifton 85 é influenciada de forma semelhante tanto pela produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea, quanto pelo teor de nitrogênio no tecido vegetal. Os meses de outubro e novembro são exemplos em que se verificaram diferentes valores de produtividade de matéria seca e de teores de N no tecido vegetal, porém, a extração de N pelo capim-tifton 85 foram semelhantes em ambos os meses (Figura 14).

A capacidade de extração de nitrogênio pelo capim-tifton 85 apresentou tendência de estabilização com posterior decaimento, para valores de CE acima dos avaliados neste trabalho, demonstrando que a extração máxima foi atingida nas condições avaliadas. A maior extração

de N proporcionada pelo aumento na CE da solução nutritiva, fez do capim-tifton 85 uma planta ideal a ser cultivada em SACs-EHSS a serem utilizados no tratamento de águas residuárias contendo elevadas concentrações de nutrientes, pois a planta responde muito bem, em termos de extração, ao aumento na disponibilidade de nutrientes em solução.

A maior extração de N proporcionada pelo capim-tifton 85 foi de $30,8 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, obtida no mês de setembro no seu cultivo em solução nutritiva de CE $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. Já a menor extração foi obtida no mês de julho, em solução nutritiva de CE $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, sendo este valor de $0,72 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Avelar *et al.* (2016) encontraram maiores concentrações de N no tecido foliar de *Mentha aquatica* em SACs-EHSS submetidos às maiores taxas de carregamento orgânico, mesmo comportamento observado por Matos *et al.* (2008) no cultivo do capim-tifton 85 em SACs-EHSS. Segundo os últimos autores, as remoções de nitrogênio pelo citado capim, variaram de 216 a 544 kg ha^{-1} , em um período de cultivo de 112 dias, o que corresponde a $5,79$ a $14,57 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Segundo Carballeira *et al.* (2016), maiores taxas de remoção de nitrogênio são alcançadas quando se aumenta a produtividade de biomassa vegetal aérea, podendo ser utilizado um modelo linear para representar a relação existente entre essas duas variáveis. Amorim *et al.* (2015) verificaram remoção de nitrogênio pelo capim-tifton 85 variando de $0,15$ a $1,51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ($0,45$ a $4,53 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$), valores muito inferiores ao obtido por Fia *et al.* (2014) que, no cultivo do capim-tifton 85 em SACs-EHSS, verificou extração de até $17,65 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ de nitrogênio ($53 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). Matos *et al.* (2009), por sua vez, obtiveram remoção média de 681 kg ha^{-1} de N, durante 110 dias de cultivo do capim-tifton 85, resultando em uma extração média de N de $18,6 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$.

5.1.3.2. Fósforo (P)

Na Figura 15, estão apresentados o teor de fósforo no tecido vegetal dos capins vetiver e tifton 85 e a capacidade de extração de fósforo pelos referidos capins, em função da CE da solução nutritiva.

De acordo com o que está apresentado na Figura 15, o teor de fósforo no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver aumentou exponencialmente, tendendo à estabilização, com o aumento nos valores de CE da solução nutritiva. Deste modo, a partir de um valor de CE não houve mais incremento no teor de P no tecido vegetal, sendo a capacidade de extração deste nutriente influenciada, principalmente, pela produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea da planta. Em relação ao capim-tifton 85, observa-se tendência de estabilização nos teores de P no tecido vegetal. Para os valores de CE avaliados neste trabalho não foi possível inferir um ponto de máximo, pois os dados disponíveis permitem avaliar apenas a parte ascendente da curva.

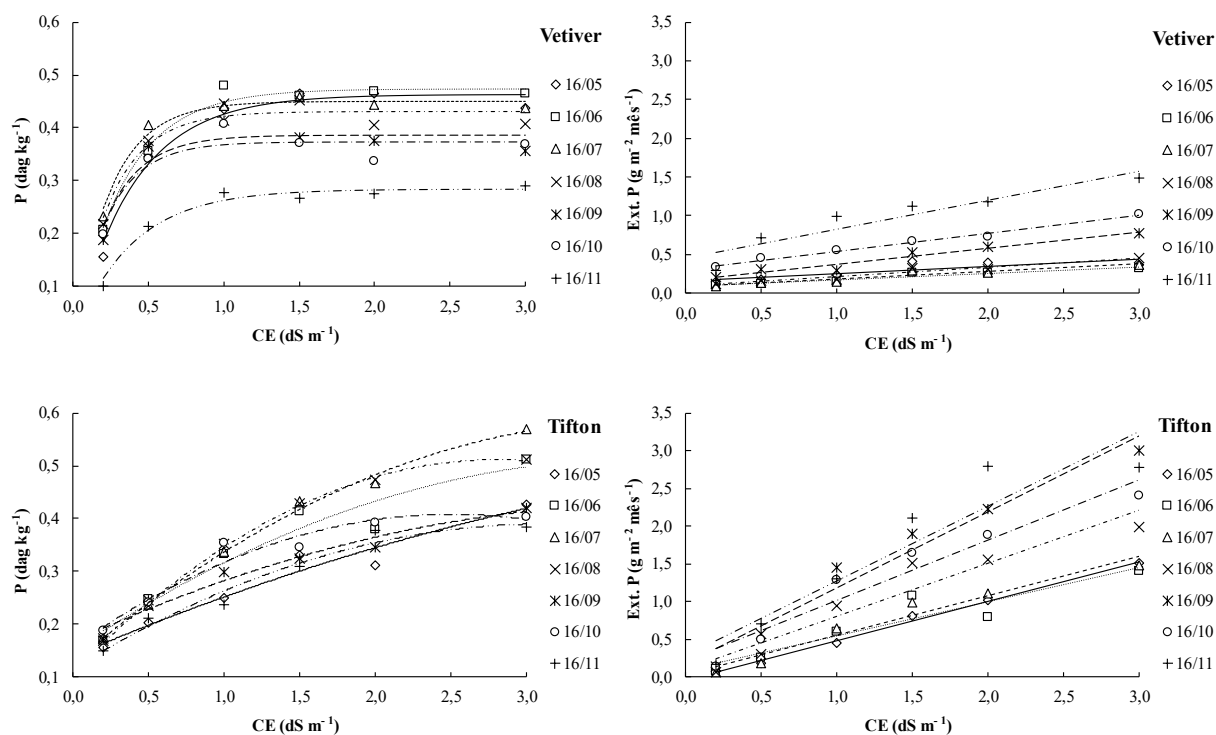


Figura 15. Teor de fósforo (P) no tecido vegetal e capacidade de extração de fósforo (Ext. P) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

Conforme observado em relação aos teores de N, o aumento na produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85 contribuiu para redução nos teores de P no tecido vegetal aéreo, sendo o período frio o que apresentou os maiores teores de P no tecido vegetal, se comparado ao período quente.

Ambos os capins apresentaram aumento linear na extração de P com aumento da CE na solução nutritiva, no entanto, o capim-tifton 85 apresentou destacada capacidade de extração, conforme pode ser observado pela maior declividade das retas ajustadas aos valores de Extração de P em função da CE da solução nutritiva (Figura 15). Se forem analisadas as curvas de teor de P no tecido vegetal, percebe-se que a maior extração do capim-tifton 85 está relacionada à sua maior produtividade de biomassa vegetal, pois apresenta menor teor de P quando comparado ao obtido no capim-vetiver.

Apesar do crescimento linear na extração de P encontrado neste trabalho, espera-se que o aumento nos valores de CE na solução nutritiva acima dos avaliados venham a acarretar estabilização e posterior redução nessa capacidade de extração, pois a produtividade do capim-vetiver e os teores de P no tecido vegetal do capim-tifton 85 tendem a se estabilizar, ou até mesmo reduzir com o aumento na concentração de nutrientes na solução nutritiva. Segundo

Avelar *et al.* (2016), a concentração de P no tecido foliar de *Mentha aquatica* não variou com o aumento na taxas de carregamento orgânico aplicadas em SACs-EHSS, comportamento semelhante ao verificado por Fia *et al.* (2011), ao avaliarem a extração de P pelo capim-tifton 85 cultivado em SACs-EHSS.

Os teores mínimo e máximo de P no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver obtidos neste trabalho foram de, respectivamente, 0,16 e 0,48 dag kg⁻¹. De acordo com Vieritz *et al.* (2003), o teor mínimo de fósforo no tecido vegetal do capim-vetiver para que haja desenvolvimento satisfatório da planta é de 0,07 dag kg⁻¹ e a concentração máxima é de 0,16 dag kg⁻¹, sendo reportados na literatura valores de até 0,60 dag kg⁻¹. Em relação a dados reportados na literatura, considerando-se cultivos realizados em sistemas alagados construídos, Jesus (2016) e Ramos *et al.* (2017) obtiveram teores de P no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver iguais a 0,39 e 0,64 dag kg⁻¹, respectivamente.

O capim-tifton 85 apresentou teor mínimo de P de 0,15 dag kg⁻¹, quando cultivado no mês de novembro, e teor máximo de 0,57 dag kg⁻¹, quando cultivado em julho. Fia *et al.* (2014) obtiveram em capim-tifton 85 cultivado em SACs de escoamento vertical, teores de P entre 0,17 e 0,41 dag kg⁻¹ no tecido aéreo dessas plantas. Matos *et al.* (2008) obtiveram teor de P no tecido vegetal aéreo do capim-tifton 85 variando de 0,3 a 0,41 dag kg⁻¹, tendo sido verificado aumento no seu teor quando da aplicação de maiores taxas de carregamento orgânico nos SACs-EHSS. Idêntico comportamento foi observado por Amorim *et al.* (2015) que, ao aumentar a taxa de aplicação superficial de nutrientes em SACs-EHSS, obtiveram teores de P no tecido vegetal aéreo do capim-tifton 85 variando entre 0,07 e 0,1 dag kg⁻¹, valores inferiores aos encontrados neste trabalho e reportados na literatura.

Na Tabela 14, estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau, ajustados de extração de P pelo capim-vetiver em função da CE da solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher.

Analisando os dois grupos formados na Tabela 14, verifica-se novamente a distinção entre o período frio e quente, conforme os resultados de produtividade de matéria seca da parte aérea das plantas. A maior extração obtida nos meses de outubro e novembro está relacionada à maior produtividade de biomassa vegetal aérea, uma vez que os teores de P no tecido vegetal, neste período, foram menores que os obtidos nos outros meses.

Tabela 14. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de

extração de P pelo capim-vetiver (Ext. P) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	R ²
G1	16/05	0,153	0,096	0,674
	16/06	0,090	0,084	0,917
	16/07	0,084	0,099	0,896
	16/08	0,099	0,117	0,934
	16/09	0,166	0,209	0,952
	M. Comum	0,118	0,121	0,923
G2	16/10	0,313	0,233	0,986
	16/11	0,455	0,374	0,877
	M. Comum	0,384	0,303	0,937

A estimativa da extração de P de SACs-EHSS é extremamente importante pois o fósforo está relacionado, junto ao nitrogênio, à eutrofização de cursos d'água e a eficiência nessa remoção deve ser avaliada com critério. A partir dos modelos comuns obtidos, pode-se estimar a capacidade de extração de P do capim-vetiver cultivados em SACs-EHSS em períodos frios e quentes, desde que seja conhecido o valor médio da CE da água residuária a ser tratada. Além disso, há possibilidade de estimar a extração de P ao longo dos SACs-EHSS, identificando qual parte do sistema apresenta maior contribuição na extração de P da água residuária em tratamento, conforme variação da CE ao longo do sistema.

Comumente é reportado que a capacidade de SACs-EHSS em remover fósforo e nitrogênio de águas residuárias da suinocultura e de laticínios tende a aumentar com o aumento nas taxas de carregamento orgânico (MATOS *et al.*, 2009; MATOS *et al.*, 2010). No entanto, Fia *et al.* (2011), avaliando esses sistemas no tratamento de água residuária da suinocultura, não verificaram o mesmo comportamento, o que foi justificado pelo fato de não ter havido diferença na produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea das plantas. Esses resultados corroboram indicativos de ser a produtividade da biomassa vegetal fator de maior importância na remoção de nutrientes pelas plantas.

A maior extração de P proporcionada pelo capim-vetiver, neste trabalho, foi de $1,49 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, sendo a menor extração de $0,09 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$ de P. Jesus (2016) encontrou, nos períodos de primavera e inverno, remoção de P pela parte aérea do capim-vetiver de 2,1 e 0,6 $\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$, respectivamente. Por outro lado, Ramos *et al.* (2017) obtiveram, para o mesmo capim, taxa de remoção de $44,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ($0,37 \text{ g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) de P, valor inferior aos obtidos por Jesus (2016), porém, condizente com os obtidos neste trabalho.

No que se refere ao capim-tifton 85, estão apresentados, na Tabela 15, os parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau, ajustados de extração de P em função da CE da solução nutritiva, para as diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher.

Tabela 15. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de P pelo capim-tifton 85 (Ext. P) ($\text{g m}^{-2} \text{mês}^{-1}$) em função da CE (dS m^{-1}) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	R ²
G1	16/05	-0,044	0,524	0,995
	16/06	0,085	0,453	0,880
	16/07	0,030	0,522	0,951
	M. Comum	0,024	0,500	0,965
G2	16/08	0,100	0,702	0,912
	16/10	0,219	0,800	0,934
	M. Comum	0,159	0,751	0,927
G3	16/09	0,167	1,010	0,961
	16/11	0,284	0,993	0,878
	M. Comum	0,225	1,001	0,934

Os grupos formados de extração de P pelo capim-tifton 85 foram idênticos aos grupos formados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea da planta, confirmando que a produtividade de matéria seca é o fator de maior influência na remoção de nutrientes em plantas cultivadas em SACs-EHSS.

Conforme observado na Tabela 15, o grupo 1 constitui-se de dados obtidos nos meses em que houve menor extração de P, sendo indicada a utilização do modelo comum para condições extremas de produtividade de matéria seca da planta, como em meses frios, nos quais o desenvolvimento vegetativo da planta é comprometido. O grupo 2 representa um período de transição que compreende datas entre o período frio e quente, já o grupo 3 foi constituído por dados referentes aos meses que apresentaram os maiores valores de produtividade de matéria seca e, conseqüentemente, maior extração de P.

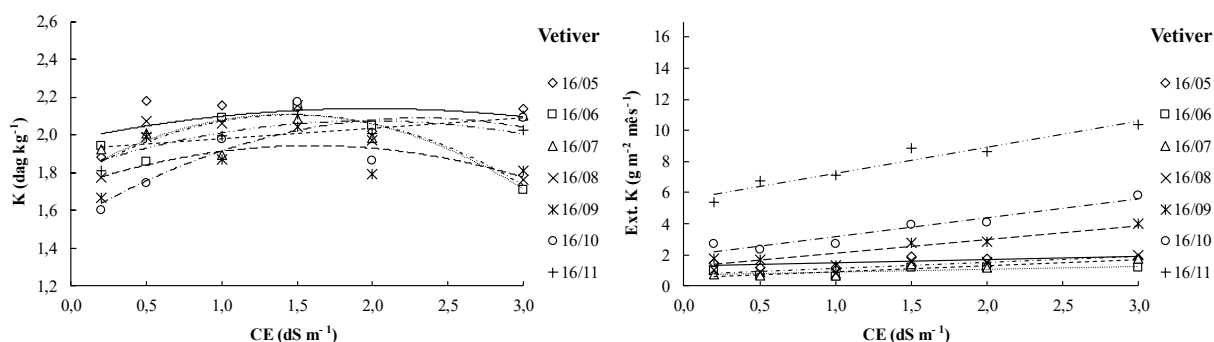
De acordo com os resultados obtidos, a variação na extração de P pelo capim-tifton 85, ao longo de SACs-EHSS, poderá apresentar grande variabilidade, dependendo dos valores de CE na água residuária em tratamento e, principalmente, da produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-tifton 85, nas diferentes partes do sistema. Neste caso, um dos modelos comuns

obtidos poderá ser utilizado para estimativa da extração de P, sendo sua escolha baseada na temperatura do ar no período de cultivo.

A máxima extração de P, obtida neste trabalho, pelo capim-tifton 85 foi de $3,0 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, quando cultivado no mês de setembro em solução nutritiva com CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$. A menor extração de P foi verificada no mês de julho, para a CE de $0,2 \text{ dS m}^{-1}$, sendo este valor de $0,06 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. Segundo Vymazal (2007), a taxa de remoção de P pelas plantas cultivadas em sistemas alagados construídos pode variar de $10 \text{ a } 20 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,8 \text{ a } 1,7 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). Jesus (2016) obteve, em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, valores de remoção de P de $0,02 \text{ e } 0,05 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($0,6 \text{ e } 1,5 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) durante as estações do inverno e primavera, respectivamente. Amorim *et al.* (2015) encontraram remoções de fósforo, pelo mesmo capim, variando de $0,06 \text{ a } 0,14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ($0,18 \text{ a } 0,42 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$), valores esses muito inferiores aos obtidos por Fia *et al.* (2014), os quais variaram de $0,62 \text{ a } 1,76 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$ ($1,86 \text{ a } 5,28 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$). Matos *et al.* (2009) obtiveram remoção média de 107 kg ha^{-1} de P pelo capim-tifton 85, em período de cultivo de 110 dias, valor equivalente a $2,9 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$. De acordo com Matos *et al.* (2010), o capim-tifton 85 apresenta aumento na capacidade extratora de P à medida que se elevava a taxa de carregamento orgânico, sendo encontradas taxas de remoção variando de $6 \text{ a } 15 \text{ g m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$ ($0,49 \text{ a } 1,23 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) de P.

5.1.3.3. Potássio (K)

Na Figura 16, estão apresentados o teor de potássio no tecido vegetal aéreo dos capins vetiver e tifton 85, e a capacidade de extração de potássio dos referidos capins, em função da CE na solução nutritiva.



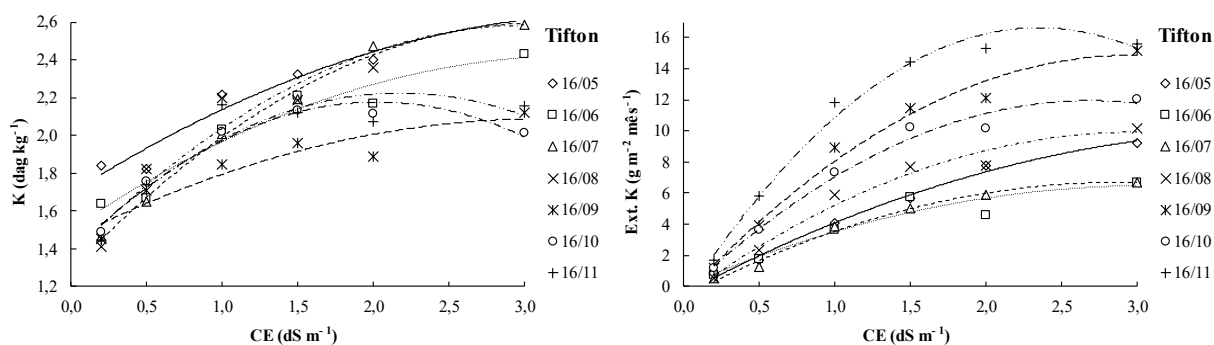


Figura 16. Teor de potássio (K) no tecido vegetal e capacidade de extração de potássio (Ext. K) pelos capins vetiver e tifton 85, em função da CE na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas em protótipos de SACs-EHSS.

O teor de potássio no tecido vegetal da parte aérea do capim-vetiver não apresentou variação significativa com o aumento na CE na solução nutritiva, deste modo, a extração de K proporcionada por esse capim dependerá, essencialmente, da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea. Verifica-se ainda, que os teores de K para as diferentes datas de corte das plantas, não diferiram em relação às épocas frias ou quentes, conforme verificado para os dados de N e P. Deste modo, infere-se que o teor de K no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver independe da época do ano e da CE na solução nutritiva. Diversos autores (MATOS *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2010; FIA *et al.*, 2011) observaram que, ao aplicar maiores taxas de carregamento orgânico, os teores de K no tecido vegetal aérea não apresentavam variação significativa, corroborando os resultados obtidos neste trabalho.

O teor médio de K no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver, considerando-se todos os cortes realizados e todos os valores de CE na solução nutritiva, foi de 1,97 dag kg⁻¹. Jesus (2016) também não observou diferença significativa nos teores de K no tecido vegetal aéreo do capim-vetiver, quando cultivado em diferentes épocas do ano e nas diferentes posições de cultivo no SAC-EHSS, tendo obtido um teor médio de 2,19 dag kg⁻¹ de K.

Em relação ao capim-tifton 85, o teor de K aumentou de forma quadrática em relação ao CE na solução nutritiva, apresentando, para os dados obtidos nos meses de outubro e novembro, um valor de máximo, para valores de CE na solução nutritiva em torno de 2 dS m⁻¹. Nos demais meses não se evidenciam a ocorrência de máximas, indicando que aumento nos valores de CE na solução nutritiva proporcionam aumento nos teores de K no tecido vegetal do capim-tifton 85. O aumento na produtividade do capim-tifton 85 nos meses mais quentes refletiu em menores teores de potássio no tecido vegetal, conforme verificado

também para os nutrientes N e P, sendo a extração de K influenciada, predominantemente pela produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea da planta.

Os teores máximo e mínimo de K no tecido vegetal aéreo do capim-tifton 85 obtidos neste trabalho foram de 2,58 e 1,41 dag kg⁻¹, respectivamente. Matos *et al.* (2010) e Jesus (2016) obtiveram, no tecido aéreo do capim-tifton 85, teores de K de 1,41 a 1,81 dag kg⁻¹, respectivamente, enquanto Fia *et al.* (2011) encontraram valores na faixa de 1,93 a 2,11 dag kg⁻¹. De acordo com Avelar *et al.* (2016), maiores taxas de carregamento orgânico resultam em maior disponibilidade de K na água residuária em tratamento, proporcionando maiores teores de K no tecido foliar das plantas, em conformidade com o comportamento observado neste trabalho.

Na Tabela 16, estão apresentados os parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau, ajustados de extração de K pelo capim-vetiver em função da CE na solução nutritiva, para as diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher.

Tabela 16. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de primeiro grau ($f(x) = A + Bx$) ajustados de extração de K pelo capim-vetiver (Ext. K) (g m⁻² mês⁻¹) em função da CE (dS m⁻¹) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	R ²
G1	16/07	0,529	0,393	0,819
	16/08	0,758	0,390	0,796
	16/09	1,221	0,869	0,822
	16/10	1,943	1,209	0,921
	M. Comum	1,113	0,715	0,8735
G2	16/11	5,573	1,668	0,935

Em relação aos dados obtidos para os meses de maio e junho, verifica-se que a CE da solução nutritiva não influenciou significativamente a extração de K pelo capim-vetiver, sendo encontrados valores médios de extração de K de 1,53 e 0,97 g m⁻² mês⁻¹, nos respectivos meses. Os dados obtidos indicaram que, nos demais meses, a extração de K aumentou linearmente com o aumento na CE da solução nutritiva, originando dois grupos capazes de representar todas as datas de corte das plantas. No primeiro grupo, o modelo comum obtido representa os dados obtidos nos meses de menor produtividade do capim-vetiver, proporcionando menor extração de K. Já o grupo 2 é constituído apenas do mês de novembro, representativo do período mais quente e de maior desenvolvimento vegetativo da planta.

A pequena variabilidade encontrada na extração de K pelo capim-vetiver com a variação da CE da solução nutritiva, demonstra que a extração de K pela parte aérea das plantas, ao longo comprimento dos SACs-EHSS, pode ser considerada constante, corroborando os resultados obtidos por Jesus (2016), no qual não se observou diferença significativa na extração de K pelo capim-vetiver nas diferentes posições de cultivo nos SACs-EHSS.

Os valores obtidos neste trabalho de extração de K pela parte aérea do capim-vetiver variou de 0,63 a 10,39 g m⁻² mês⁻¹, sendo, em média, inferior aos apresentados por Jesus (2016), que obteve, nos períodos de inverno e primavera, remoção de K de 4,2 e 18 g m⁻² mês⁻¹, respectivamente.

Os parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau, ajustados de extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85 em função da CE da solução nutritiva, para as diferentes datas de corte das plantas, bem como os grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher, estão apresentados na Tabela 17.

Tabela 17. Grupos formados pela análise de agrupamento por otimização de Tocher e parâmetros médios estimados dos polinômios de segundo grau ($f(x) = A + Bx + Cx^2$) ajustados de extração de K (Ext. K) (g m⁻² mês⁻¹) pelo capim-tifton 85, em função da CE (dS m⁻¹) na solução nutritiva, nas diferentes datas de corte das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS.

GRUPO	DATA	A	B	C	R ²
G1	16/05	-0,461	5,199	-0,642	0,992
	16/06	0,011	4,191	-0,678	0,914
	16/07	-0,663	5,093	-0,881	0,989
	16/08	-0,665	7,058	-1,176	0,976
	16/09	-0,611	10,428	-1,757	0,984
	16/10	-0,469	9,226	-1,714	0,983
	M. Comum		-0,476	6,866	-1,141
G2	16/11	-0,820	14,851	-3,159	0,988

Os modelos de extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85 foram agrupados em apenas dois grupos, sendo gerado um modelo comum para o grupo 1, que contempla quase todas as datas de corte das plantas, e o grupo 2, correspondente ao mês de novembro. Apesar da grande variabilidade observada na extração de K pelo capim-tifton 85, considerando as diferentes datas de corte das plantas, observa-se que as primeiras seis datas foram representadas por um modelo comum, portanto, a estimativa da extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85 pode ser realizada considerando-se dois períodos de cultivo da planta, um de menor

produtividade, característico dos meses frios do ano, e outro de maior produtividade decorrente dos meses mais quentes.

Os resultados das análises de agrupamento para extração de K pela parte aérea do capim-vetiver, assim como ocorreu em relação ao capim-tifton 85, resultaram em um grupo unitário para os dados obtidos no mês de novembro, consequência da interação produtividade de biomassa vegetal aérea e o teor de K no tecido vegetal aéreo. Nesse mês, a produtividade de matéria seca foi a maior, ao ser comparada à obtida em outros meses e, em consequência, o teor de K não foi o menor entre todas as datas de avaliação do desenvolvimento da planta.

A extração de K proporcionada pela parte aérea do capim-tifton 85, para os diferentes períodos de cultivo e CE na solução nutritiva, variou de 0,52 a 15,59 g m⁻² mês⁻¹. Valores semelhantes foram encontrados por Jesus (2016) no tecido vegetal aéreo do capim-tifton 85 cultivado em SACs-EHSS, utilizados no tratamento de esgoto sanitário, no período de inverno e primavera, sendo essa capacidade de extração de K de 0,11 e 0,43 g m⁻² d⁻¹ (3,3 e 12,9 g m⁻² mês⁻¹), respectivamente. Matos *et al.* (2009) obtiveram capacidade extratora média de K pela parte aérea do capim-tifton 85 de 5,36 kg ha⁻¹ d⁻¹ (16,1 g m⁻² mês⁻¹), valor 3 vezes superior ao obtido por Fia *et al.* (2011) (1,67 kg ha⁻¹ d⁻¹ ou 5,01 g m⁻² mês⁻¹), em SACs-EHSS utilizados no tratamento da água residuária da suinocultura. De acordo com autores como Matos *et al.* (2008) e Matos *et al.* (2010), a extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85 aumentou com a aplicação de maiores taxas de carregamento orgânico, tendo sido encontrados, pelos citados autores, valores entre 1,03 a 1,82 kg ha⁻¹ d⁻¹ (3,09 a 5,46 g m⁻² mês⁻¹) e 308 a 524 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (2,53 a 4,31 g m⁻² mês⁻¹), respectivamente.

Considerando os resultados de extração de nutrientes/poluentes pelas plantas em SACs-EHSS, verifica-se que o aumento na produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea, proporcionado pelos maiores valores de CE na solução nutritiva, é a principal responsável pelas elevadas taxas de extração. De acordo com Musyimi *et al.* (2010), a maior disponibilidade de nutrientes para as plantas pode aumentar a taxa de absorção pelo sistema radicular, favorecendo o acúmulo de nutrientes no tecido vegetal, bem como, o aumento na área foliar para transpiração e fotossíntese. Segundo os autores, o aumento na capacidade fotossintética das plantas contribui para o acúmulo de biomassa vegetal, verificado pelo aumento na massa seca dos caules e raízes das plantas.

Gao *et al.* (2014), avaliando a capacidade de extração de nutrientes e a produtividade do Iris (*Iris sibirica*) cultivados em SAC, verificaram que a habilidade das plantas em acumular nutrientes, aumenta com o maior aporte de nutrientes ao sistema. Há de se considerar, no entanto, que existem limites para isso. Segundo Fia *et al.* (2011), a capacidade das plantas em

remover nutrientes/poluentes de SACs torna-se maior quando são aplicadas menores cargas de nutrientes. De forma semelhante, Mendonça *et al.* (2017), avaliando a eficiência de remoção de nitrogênio e fósforo de SACs utilizados no tratamento de água residuária de laticínios, observaram que as macrófitas *Typha domingensis* (taboa) e o *Hedychium coronarium* (lírio do brejo) apresentaram maior eficiência na remoção de nitrogênio, quando os SACs foram submetidos a menores taxas de carregamento do nutriente.

Neste estudo, foi observada elevada variabilidade na extração de nutrientes/poluentes pelas plantas devido a diferentes concentrações de nutrientes no meio, proporcionadas pela variação nos valores de CE da solução nutritiva, corroborando os resultados encontrados por Matos *et al.* (2008) e Matos *et al.* (2010), que verificaram que aumento nas taxas de carregamento orgânico propiciaram maiores remoções de N-P-K pelas plantas. Segundo Nazário *et al.* (2014), o aumento nas taxas de aplicação de esgoto sanitário em sistemas de fertirrigação proporcionaram aumento linear no acúmulo de fósforo e potássio no tecido vegetal do capim-tifton 85, resultando em extrações de N e K de 252 e 195 kg ha⁻¹, respectivamente, para um período de cultivo de 28 dias (27 e 20,9 g m⁻² mês⁻¹). Paula *et al.* (2011), avaliando o crescimento e nutrição mineral de milho forrageiro em cultivo hidropônico com soro de leite bovino, verificaram que o aumento nas concentrações de soro de leite promoveu acréscimo linear nos teores de N na parte aérea das plantas, estabilidade no teor de K e não apresentaram efeito nos teores de P.

Outro aspecto importante a ser considerado na extração de nutrientes pelas plantas, refere-se às condições climáticas durante o desenvolvimento vegetativo das plantas, principalmente a temperatura média do ar. Jesus (2016), avaliando a capacidade de extração de nutrientes/poluentes pelos capins vetiver e tifton cultivados em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, observou que a estação da primavera proporcionou maior remoção quando comparado ao que foi obtido na estação de inverno. Além disso, o correto manejo das plantas em sistemas alagados construídos, a partir de cortes frequentes em períodos mais quentes, também pode potencializar o crescimento e evitar o acamamento das plantas, assim pode-se maximizar a remoção de nutrientes/poluentes pela biomassa vegetal aérea (WELLER *et al.*, 2016).

5.2. Validação dos modelos obtidos para SACs-EHSS tratando esgoto sanitário

A validação dos modelos obtidos foi realizada ao se utilizar dados provenientes dos SACs-EHSS construídos em escala plena e cultivados com capins vetiver e tifton 85, utilizados

no tratamento de esgoto sanitário, no mesmo período de condução do experimento conduzido nos protótipos.

Na Figura 17, estão apresentados os valores diários de evapotranspiração dos capins vetiver e tifton 85 cultivados nos SACs-EHSS, bem como, a precipitação diária ocorrida ao longo do período experimental.

O capim-vetiver apresentou maiores valores de ET_C que o capim-tifton 85 em todo o período experimental, sendo, no entanto, o comportamento da ET_C ao longo tempo, semelhante para ambas as espécies. Em relação à precipitação, houve poucos eventos registrados no período, o que não proporcionou alterações significativas no balanço hídrico utilizado no cálculo da ET_C das culturas e na CE do esgoto sanitário tratado no sistema.

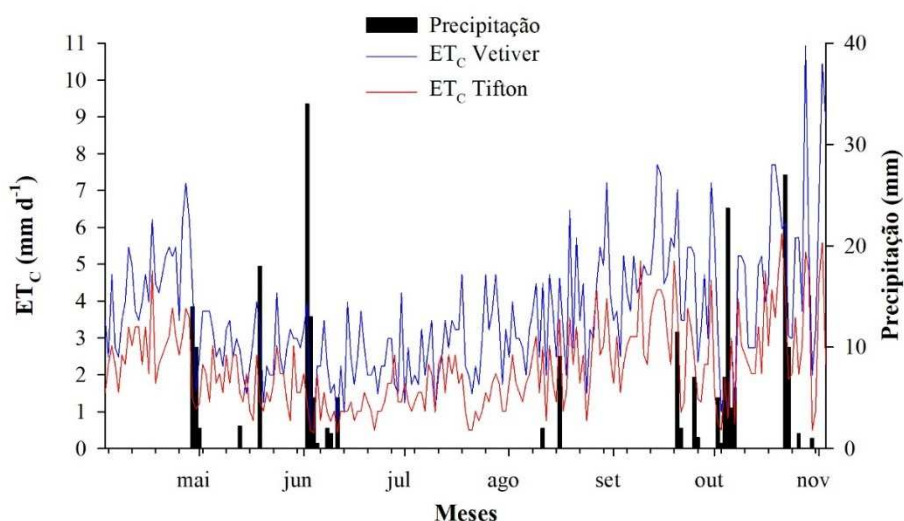


Figura 17. Valores diários de evapotranspiração (ET_C) dos capins vetiver e tifton 85, e de precipitação, monitorados ao longo do período experimental nos SACs-EHSS em escala plena.

Os baixos valores de DBO no esgoto sanitário afluente (Tabela 3) devem-se ao tratamento primário ao qual foi submetido, uma vez que, ao ficar armazenado por aproximadamente 2 dias no poço de coleta e nas caixas de distribuição, recebeu tratamento semelhante ao que ocorre em um decanto digestor do tipo tanque séptico. As variações observadas durante o período experimental são devidas às próprias variações naturais na concentração do esgoto sanitário, principalmente dada à pequena área de coleta no sistema de esgotamento.

Os valores médios de CE no esgoto sanitário em tratamento ao longo do comprimento dos SACs-EHSS cultivados com os capins vetiver e tifton 85 estão representados, por ocasião das datas de corte das plantas, na Figura 18.

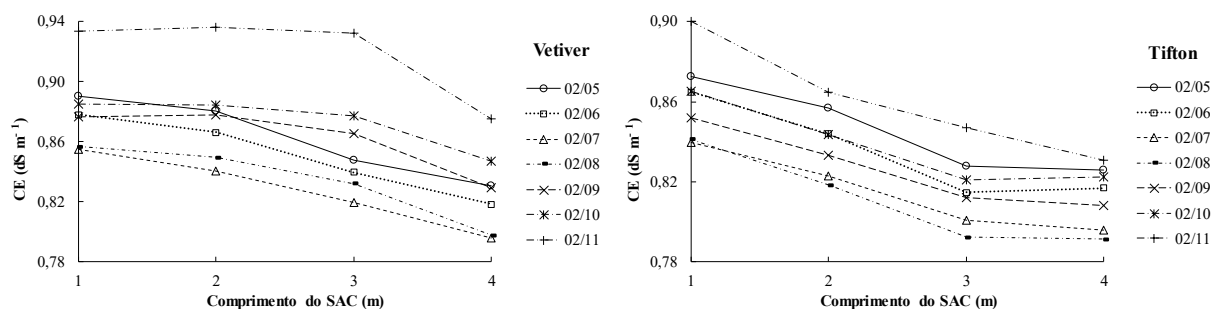


Figura 18. Valores médios de condutividade elétrica no esgoto sanitário em tratamento ao longo dos SACs-EHSS em escala plena, cultivados com os capins vetiver e tifton 85, por ocasião das datas de corte das plantas.

De acordo com os dados apresentados na Figura 18, houve redução na CE da água residuária em tratamento ao longo do sistema, o que pode estar relacionado à extração de nutrientes pelas plantas cultivadas nos SACs-EHSS e pela ação biológica dos microrganismos presentes no meio. Com a redução nos valores de CE no esgoto sanitário ao longo do comprimento do sistema, pode-se inferir que a quantidade de íons extraídos pelas plantas e outros processos, como adsorção e precipitação como sais, teve maior influência que os aumentos nos valores de CE proporcionados pela perda de água ocasionada no processo evapotranspirativo. Essa tendência já era esperada, pois em um efluente diluído como o esgoto sanitário, a quantidade de água a ser evaporada capaz de causar aumentos sensíveis na CE na solução teria que ser muito alta, o que não ocorre com uma água residuária que possui maior concentração de sais, uma vez que a perda de pequena porção de água pode ser suficiente para influenciar, substancialmente, os valores da CE na solução. Logo, o aumento ou redução na CE do efluente em tratamento em SACs-EHSS é uma característica peculiar da água residuária a ser tratada, do sistema de tratamento, da planta cultivada e das condições climáticas do local.

5.2.1. Validação dos modelos de estimativa da ET_C

Conforme discutido anteriormente, a estimativa dos valores de K_C para o capim-vetiver cultivados em SACs-EHSS, independeram dos valores de CE da solução nutritiva, deste modo, a utilização dos valores médios de K_C para as Fases I, II e III, considerando-se tanto as épocas frias como as épocas quentes do ano, são suficientes na determinação da evapotranspiração da cultura em projetos de SACs-EHSS ou para monitoramento da perda de água ao longo do sistema.

Na primeira fase de desenvolvimento vegetativo do capim-vetiver cultivado nos protótipos de SACs-EHSS alimentados com soluções nutritivas de diferentes CEs, o valor

médio de K_C e o respectivo desvio padrão, obtidos para as diferentes condições climáticas, foi igual a 1,03 e 0,11. Em contrapartida, a média dos valores de K_C obtida no SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário, cultivado com o referido capim, foi de $0,99 \pm 0,09$. A partir desses resultados, pode-se concluir que os valores médios de K_C não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo Teste t . Portanto, fica evidente que durante a Fase I, a estimativa da ET_C do capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS, poderá ser realizada utilizando-se o valor médio de K_C , independente dos valores de CE do efluente em tratamento. Essa possibilidade decorre do fato de que, logo após efetuado o corte da parte aérea das plantas, a evaporação da água passa a ser a principal componente da evapotranspiração em SACs-EHSS.

Na Fase II, a estimativa dos valores de K_C poderá ser realizada a partir dos valores médios obtidos nas épocas frias e quentes do ano, conforme a análise de agrupamento realizada. Deste modo, no período frio, o valor de K_C para o capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS poderá ser considerado igual a $0,95 \pm 0,11$ e no período quente igual a $1,36 \pm 0,18$. Os valores de K_C obtidos para o SAC-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário nos períodos frio e quente foram de $1,07 \pm 0,03$ e $1,30 \pm 0,12$, respectivamente. De acordo com esses valores, conclui-se que as médias de K_C para um mesmo período, não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo Teste t . Logo, a utilização dos valores médios obtidos nos protótipos de SACs-EHSS, são suficientes para a estimativa da ET_C em SACs-EHSS cultivados com capim-vetiver, utilizados no tratamento de esgoto sanitário de características semelhantes ao utilizado neste experimento.

A Fase III também foi diferenciada entre período frio e quente, sendo os valores médios de K_C obtidos nos protótipos de SACs-EHSS, iguais a $1,12 \pm 0,08$ e $1,60 \pm 0,20$; respectivamente. Para o sistema em escala plena de tratamento, esses valores foram iguais a $1,23 \pm 0,09$ e $1,73 \pm 0,11$; para os respectivos períodos frio e quente. Comparando-se os valores médios de K_C para períodos semelhantes, verifica-se que esses não diferem significativamente entre si, a 5% de probabilidade, pelo Teste t . Dada a variabilidade apresentada pelos valores de K_C , torna-se evidente a viabilidade da utilização dos resultados obtidos nos protótipos de SACs-EHSS na estimativa dos valores de ET_C do capim-vetiver cultivado nesses sistemas de tratamento.

Apesar de não ter sido monitorado, pode-se considerar constante a ET_C do capim-vetiver ao longo do SAC-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, dada a pequena variação na CE da água residuária em tratamento ao longo do sistema (Figura 18) e, principalmente, devido à baixa variabilidade na produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver, ao

longo do seu comprimento. Além disso, como observado na avaliação dos SACs-EHSS em escala de protótipo, o K_C do capim-vetiver independe do valor da CE.

A partir das análises realizadas anteriormente, a utilização de valores médios de K_C do capim-vetiver para estimativa da ET_C em SACs-EHSS, constitui um método eficiente, por apresentar resultados satisfatórios e por sua simplicidade, atendendo as necessidades atuais, dada a falta de informações a respeito do assunto. Ressalta-se, no entanto, que a utilização dos dados obtidos neste estudo, deve-se limitar às condições climáticas semelhantes às quais o experimento foi desenvolvido.

A validação dos valores de K_C do capim-tifton obtidos nos protótipos de SACs-EHSS foi realizada comparando-se as diferentes fases de desenvolvimento vegetativo da planta e os respectivos períodos frios e quentes do ano. Na Fase I, os valores recomendados de K_C independeram da CE da água residuária a ser tratada e da época do ano, sendo este valor igual a $1,17 \pm 0,15$. No entanto, a média dos valores de K_C obtida no SAC-EHSS cultivado com o referido capim e utilizado no tratamento de esgoto sanitário, foi de $0,65 \pm 0,07$, valor fora da faixa de variação observada para os resultados obtidos nos protótipos.

Em relação às Fases II e III, os valores de K_C variaram em função da CE na solução nutritiva e da temperatura média do ar no período de cultivo das plantas, sendo apresentados na Figura 19, os valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de K_C do capim-tifton 85, quando cultivado em SAC-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário. A estimativa dos valores de K_C foi realizada utilizando-se os modelos comuns provenientes da análise de agrupamento (Tabela 7) e os valores médios de CE do esgoto sanitário no sistema de tratamento, sendo expressados por linhas pontilhadas que representam as temperaturas (baixa, média e alta) de cultivo do capim-tifton 85.

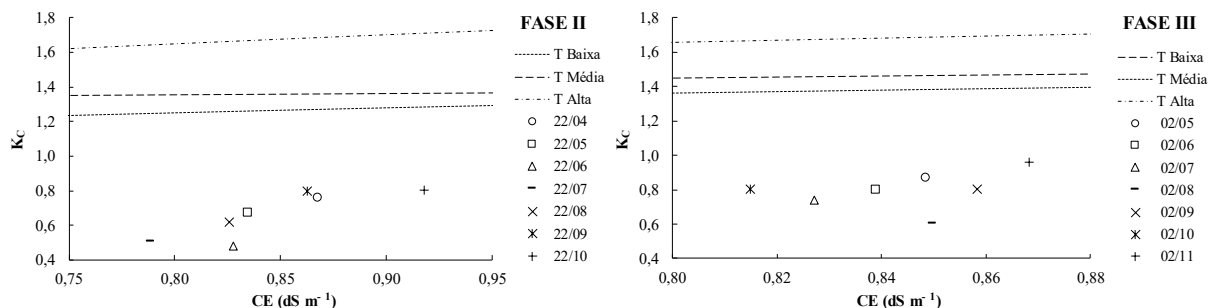


Figura 19. Valores estimados e reais de K_C , em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes datas e fases de desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85 cultivado em SAC-EHSS em escala plena.

Observa-se, na Figura 19, que os modelos obtidos para estimativa de K_C do capim-tifton 85 superestimaram os valores de K_C da respectiva planta quando cultivada em SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário. Os valores observados em escala plena foram muito inferiores aos estimados pelos modelos provenientes de dados obtidos nos protótipos dos SACs-EHSS, mesmo quando levado em consideração apenas o modelo indicado para o período frio do ano, em que a produtividade de biomassa vegetal aérea se torna menor e, conseqüentemente, menores são os valores de K_C . Deste modo, a estimativa da ET_C do capim-tifton 85 nas Fases I, II e III, quando cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, a partir do método anteriormente apresentado, não se mostrou adequada, neste trabalho, devendo-se avaliar valores de K_C obtidos em SACs-EHSS utilizados no tratamento de outros tipos de água residuária, para melhor análise dos modelos propostos.

A superestimativa dos valores de K_C observada neste trabalho pode estar relacionada com a idade das plantas cultivadas no SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário, já que, por terem passado por inúmeros cortes da parte aérea, o capim-tifton 85 apresentava sinais de baixo desenvolvimento vegetativo, o que também pode ser consequência da baixa disponibilidade de nutrientes neste tipo de água residuária. No entanto, comparando-se os dados experimentais apresentados nas Figura 11 e Figura 19, verifica-se que os valores de K_C obtidos em sistema alimentado com esgoto sanitário foram inferiores ao obtido no protótipo de SAC-EHSS alimentado com solução nutritiva com CE de a 0,2 dS m⁻¹. Isso indica que a disponibilidade de nutrientes não foi o principal fator responsável pelo baixo valor de K_C .

A presença de material orgânico seco na superfície do SAC-EHSS de escala plena proporcionou menor exposição do substrato à radiação solar, reduzindo a evaporação da água e os valores de K_C , principalmente na Fase I. Nas demais fases, atribui-se a menor produtividade de biomassa vegetal aérea obtida no SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário, os baixos valores de K_C observados. Na Figura 20, estão apresentadas as condições visuais das plantas cultivadas no SAC-EHSS em escala plena, após 0, 8, 16 e 24 dias de efetivação do corte da parte aérea do capim-tifton 85.

Em relação ao K_C do capim-tifton 85, sabe-se, conforme já discutido, que o cultivo em solo proporciona menores valores dessa variável, quando comparado ao cultivo em sistemas alagados construídos, quando se compara valores obtidos em área de pastagem (SANTANA *et al.*, 2016), por exemplo, com os obtidos por Pinto *et al.* (2007). Entretanto, isso não foi constatado neste experimento, comprometendo a validação dos modelos de estimativa recomendados neste trabalho.



Figura 20. Aspecto visual do desenvolvimento do capim-tifton 85, respectivamente aos 0, 8, 16 e 24 dias após efetuado o corte, da sua parte aérea, cultivado em SACs-EHSS construídos em escala plena e utilizados no tratamento de esgoto sanitário.

A partir dos resultados apresentados, os modelos ajustados neste trabalho devem ser empregados com cautela para estimativa da ET_C do capim-tifton 85, cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, em escala plena. Isso decorre da superestimava na evapotranspiração, principalmente se a idade das plantas for maior que as cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS, onde foram obtidos os dados utilizados no ajuste dos modelos. Sugere-se que, para estimar a ET_C nestes sistemas, sejam utilizados dados obtidos em protótipos de SACs-EHSS que estejam em operação há mais tempo, uma vez que esse fator exerce influência na variável avaliada.

5.2.2. Validação dos modelos de estimativa da produtividade

A partir dos modelos de estimativa da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, foram plotados os valores de produtividade estimada, obtidos por meio dos modelos comuns (Tabela 10 e Tabela 11) e dos valores de CE no esgoto sanitário, ao longo do sistema de tratamento, e os valores de produtividade obtidas em SACs-EHSS construídos em escala plena, utilizados no tratamento de esgoto sanitário, nos quais foram realizados 7 cortes da parte aérea dos referidos capins (Figura 21).

Conforme realizado nos gráficos anteriores, as linhas pontilhadas representam as estimativas de produtividade de matéria seca da parte aérea, para diferentes temperaturas (baixa, média e alta) de cultivo dos capins vetiver e tifton 85. Por sua vez, os valores de produtividade real, obtidos ao longo do comprimento do SAC-EHSS, estão representados por marcadores, totalizando quatro dados de produtividade para cada data de corte.

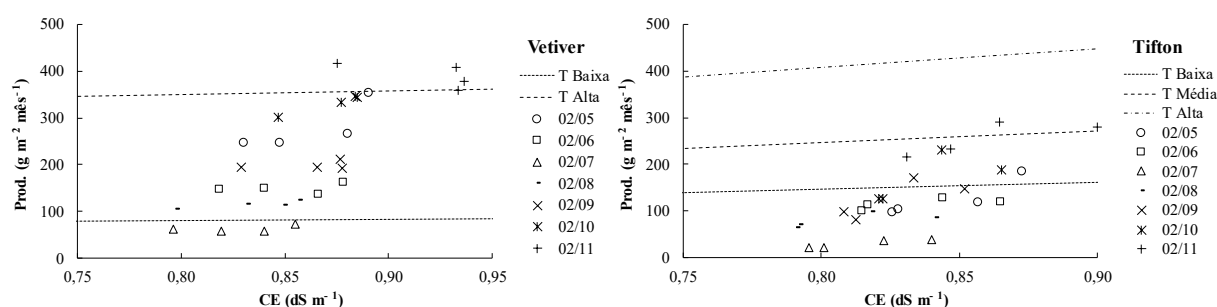


Figura 21. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de produtividade de matéria seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE no esgoto sanitário, para diferentes condições de temperatura e épocas do ano.

Os dados de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do capim-vetiver, proveniente do SAC-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, foi condizente com os valores estimados pelos modelos, pois a grande parte dos pontos estão localizados entre as curvas representativas do período frio e quente do ano. Observa-se uma diferenciação entre a produtividade de matéria seca da parte aérea proveniente de cortes realizados em meses mais frios, e conseqüentemente, mais próximos da linha que representa o modelo de estimativa dessa produtividade no período frio, em relação aos obtidos nos meses mais quentes, mais próximos à linha representativa do modelo de estimativa para o período quente.

A variação na produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-vetiver ao longo do SAC-EHSS, decorrente da variação da CE no esgoto sanitário, também foi estimada de forma satisfatória, conforme o paralelismo observado entre as linhas representativas dos modelos e os valores de produtividade obtidos nas diferentes porções do SAC-EHSS. Deste modo, os modelos obtidos para estimativa da produtividade de biomassa vegetal aérea seca do capim-vetiver poderá ser utilizado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, conforme comprovado anteriormente, desde que seja considerado o período do ano em que se realizará o cultivo.

Em relação ao capim-tifton 85, os modelos obtidos não propiciaram estimativa, de forma satisfatória, da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea do referido capim, conforme observado na Figura 21, em que a maior parte dos pontos estão compreendidos abaixo da linha representativa do modelo de estimativa do período frio. Acredita-se que a menor produtividade obtida no sistema real de tratamento esteja relacionada, conforme já discutido anteriormente, ao baixo desenvolvimento vegetativo do capim-tifton 85, o qual pode ser decorrente da idade das plantas e dos inúmeros cortes realizados em sua parte aérea. Segundo Carr *et al.* (1997), a idade das plantas e o processo de aclimação ao ambiente que ocorre nas

condições reais de campo, pode influenciar na produtividade e proporcionar estimativas diferentes das obtidas, quando se utilizam dados provenientes de experimentos conduzidos sob condições controladas.

Diversos autores (MATOS *et al.*, 2008; FIA *et al.*, 2011; AMORIM *et al.*, 2015; GARCIA *et al.*, 2015; JESUS, 2016) encontraram produtividade de biomassa vegetal aérea do capim-tifton 85 condizentes com os valores obtidos nos protótipos de SACs-EHSS, logo, pressupõem-se a adequabilidade dos modelos de estimativa de produtividade do capim-tifton 85, quando cultivados em SACs-EHSS em que as plantas apresentem crescimento normal.

Em relação à variação na produtividade da parte aérea das plantas ao longo do SAC-EHSS, verifica-se que, traçando-se uma linha de tendência entre os quatro valores de produtividade para cada corte, se obtém uma declividade semelhante à obtida nos modelos de estimativa. Isso comprova a possibilidade e a potencialidade em estimar a variabilidade na produtividade de matéria seca da parte aérea do capim-tifton 85 ao longo de SACs-EHSS, utilizados no tratamento de águas residuárias, desde que os valores de CE ao longo desses sistemas sejam conhecidos.

Considerando-se que, os modelos de estimativa de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea dos capins vetiver e tifton 85 foram obtidos mediante o cultivo com solução nutritiva, a qual possuía todos os nutrientes essenciais ao desenvolvimento vegetativo dessas plantas, conclui-se que esses modelos representam o potencial de produtividade dos referidos capins. Portanto, pode-se inferir que o capim-vetiver demonstrou todo seu potencial de produtividade no tratamento do esgoto sanitário, enquanto, no que se refere ao capim-tifton 85, não houve expressão de todo o potencial produtivo dessa planta, indicando que essa cultura seja indicada para cultivos em SACs-EHSS utilizados no tratamento de águas residuárias ainda mais concentradas. Com base nisso, considera-se essencial que, antes de se definir a espécie vegetal a ser cultivada nos SACs-EHSS, seja efetuada uma avaliação detalhada das características da água residuária a ser tratada, devido à grande variabilidade nutricional que essas apresentam.

5.2.3. Validação dos modelos de estimativa da capacidade de extração de nutrientes

5.2.3.1. Nitrogênio (N)

Na Figura 22, estão apresentados os valores estimados de extração de N, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, para diferentes condições de temperatura do ar, assim como os valores reais obtidos no sistema de tratamento de esgoto sanitário (SAC-EHSS em escala real).

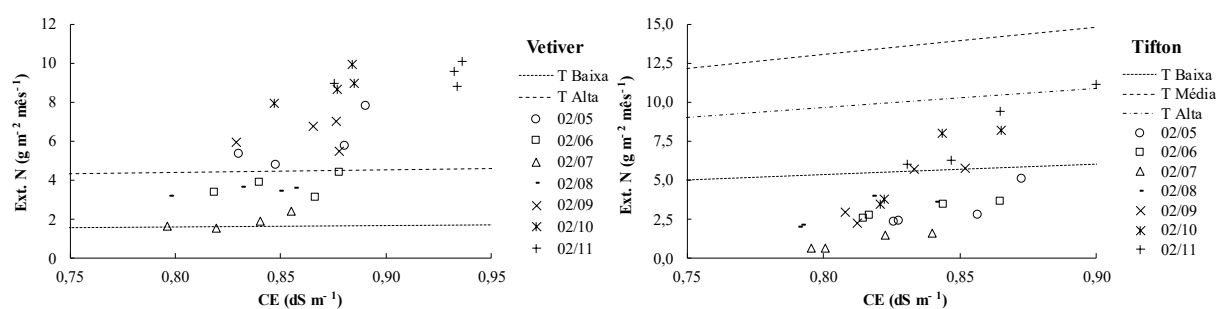


Figura 22. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de N, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.

De acordo com os dados apresentados na Figura 22, a extração de N proporcionada pelo capim-vetiver cultivado no SAC-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário foi superior à estimativa realizada quando são utilizados os modelos, tanto para o período frio como para o período quente do ano. Esses resultados se devem ao maior teor de N no tecido vegetal da parte aérea do capim-vetiver, uma vez que a produtividade foi estimada de maneira satisfatória, conforme apresentado anteriormente. O maior teor de N no tecido vegetal aéreo das plantas cultivadas no SAC-EHSS receptor de esgoto sanitário pode ser atribuído à absorção preferencial do íon amônio em relação ao íon nitrato, conforme observado por diversos autores (DELIS *et al.*, 2015; RAHARJO *et al.*, 2015; YEBOAH *et al.*, 2015), ao avaliarem a utilização do capim-vetiver no tratamento de diferentes tipos de águas residuárias. Apesar da concentração de nitrogênio total na solução nutritiva ser maior que a concentração no esgoto sanitário, acredita-se que a predominância do íon amônio neste tipo de água residuária seja o principal fator responsável por esses resultados. Simultaneamente, a degradação do material orgânico retido nos poros do sistema pode contribuir, substancialmente, na disponibilização de nutrientes, principalmente nitrogênio na forma amoniacal, quando o SAC-EHSS está em operação a vários anos.

O valor máximo de extração de N ($10,1 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) via parte aérea do capim-vetiver cultivado em SAC-EHSS em escala plena, utilizados no tratamento do esgoto sanitário, foi superior ao valor obtido no protótipo ($8,2 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$) alimentado com solução nutritiva, para uma CE de $3,0 \text{ dS m}^{-1}$, demonstrando que o capim-vetiver possui estratégias próprias de absorção de N acima da sua necessidade, exibindo um consumo "de luxo" quando cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de efluentes que possuem nitrogênio amoniacal.

Em relação ao capim-tifton 85, os modelos de estimativa da extração de N superestimaram os valores reais, seguindo a mesma tendência da produtividade de biomassa

vegetal aérea. Entretanto, os teores de nitrogênio no tecido vegetal da parte aérea do capim-tifton 85, tanto nas plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS alimentados com solução nutritiva de diferentes CEs, quanto as cultivadas no SAC-EHSS receptor de esgoto sanitário, foram semelhantes, sendo a produtividade o fator determinante para a diferenciação na capacidade de extração de nitrogênio pela cultura.

Autores como Matos *et al.* (2008), Matos *et al.* (2009) e Fia *et al.* (2014) encontraram valores de extração de N pela parte aérea do capim-tifton 85 semelhantes aos observados nos protótipos de SACs-EHSS, por essa razão, recomenda-se a utilização dos modelos para estimativa da extração de N pelo capim-tifton 85, mesmo quando cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, desde que as plantas apresentem desenvolvimento vegetativo normal.

5.2.3.2. Fósforo (P)

As representações gráficas dos valores estimados de extração de P pela parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, para diferentes condições de temperatura do ar, estão apresentadas na Figura 23, sendo plotados, nestes gráficos, os valores obtidos de extração de P no SAC-EHSS, escala plena, utilizado no tratamento do esgoto sanitário.

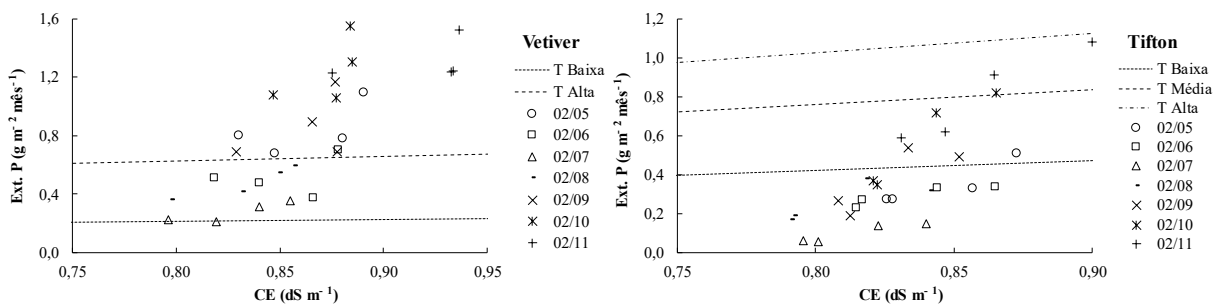


Figura 23. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de P, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para as diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.

As estimativas da extração de P pelo capim-vetiver foram menores que os valores obtidos no sistema de tratamento de esgoto sanitário. No entanto, verifica-se que no mês de julho o modelo obtido para o período de baixas temperaturas possibilitou estimativas satisfatórias dessa extração. Os maiores valores de extração de P obtidos no sistema de tratamento construído em escala plena estão relacionados ao maior teor de P no tecido vegetal da parte aérea do referido capim, de forma semelhante ao que foi observado em relação aos teores de nitrogênio.

Analisando os resultados obtidos por Jesus (2016), verifica-se que a extração de P pelo capim-vetiver no período de inverno está condizente com os valores estimados utilizando-se o modelo ajustado neste trabalho. Todavia, a extração de P obtida, pelo citado autor, no período de primavera é quase cinco vezes superior à estimada utilizando-se o modelo obtido para o período de maiores temperaturas do ar. Deste modo, o modelo de estimativa da extração de P via parte aérea do capim-vetiver, representativo do período quente do ano, mostrou-se inapropriado para estimativas a serem realizadas em SACs-EHSS alimentados com esgoto sanitário.

No que se refere ao modelo para estimativa da extração de P pela parte aérea do capim-vetiver cultivado no período de baixas temperaturas, recomenda-se sua utilização, não apenas para estimar a extração mínima proporcionada pela parte aérea do capim-vetiver, ao longo do ano, mas também para estimativa da variação na extração de P ao longo do comprimento dos SACs-EHSS, de acordo com as alterações nos valores de CE na água residuária em tratamento.

Em relação ao capim-tifton 85, os modelos de estimativa da extração de P pela sua parte aérea proporcionaram superestimativas dos valores reais obtidos no SAC-EHSS utilizado no tratamento do esgoto sanitário, consequência da menor produtividade de biomassa vegetal aérea seca, nesse sistema. Observa-se que os valores estimados de extração de P utilizando-se o modelo ajustado para o período de médias temperaturas, quase não foram superados pelos valores reais obtidos em campo, mesmo quando se considera os cortes realizados em meses mais quentes, como por exemplo, outubro e novembro.

Jesus (2016) obteve, para o mesmo SAC-EHSS utilizado neste trabalho, extração de P pela parte aérea do capim-tifton 85, nas estações de inverno e primavera, de 0,6 e 1,5 g m⁻² mês⁻¹, respectivamente. Valores superiores foram reportados por Matos *et al.* (2009) e Fia *et al.* (2014), em SACs-EHSS cultivados com o referido capim, demonstrando que os modelos de estimativa da extração de P pela parte aérea do capim-tifton 85 tendem a fornecer valores condizentes com os verificados em sistemas de tratamento construídos em escala plena, portanto, não superestimados, conforme foi observado neste trabalho.

5.2.3.3. Potássio (K)

Na Figura 24, estão representados os valores estimados e reais (obtidos nos SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de K pela parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, quando cultivados em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário, para diferentes datas de corte e condições de temperatura do ar.

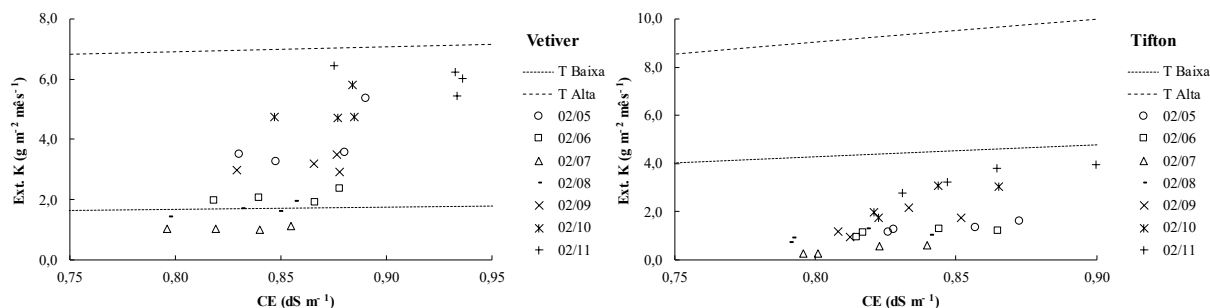


Figura 24. Valores estimados e reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de K, via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, em função da CE do esgoto sanitário, para diferentes épocas do ano e condições de temperatura do ar.

Observa-se, na Figura 24, que os modelos de estimativa de extração de K pela parte aérea do capim-vetiver possibilitaram estimativas satisfatórias dessa variável, quando esse foi cultivado em SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário. O modelo obtido para o período de temperaturas mais baixas mostrou-se mais eficiente, pela maior proximidade dos valores reais de campo (obtidos no SAC-EHSS em escala plena), já o modelo ajustado para o período de temperaturas mais altas, proporcionou pequena superestimava nos valores de extração de K, as quais podem ser consideradas insignificante em relação às variações observadas. A utilização de ambos os modelos poderá fornecer uma faixa de valores esperados de extração de K via parte aérea do capim-vetiver cultivado em SACs-EHSS utilizados no tratamento de esgoto sanitário.

Verifica-se, novamente, o paralelismo entre as curvas representativas dos modelos e os valores reais (obtidos em SACs-EHSS construídos em escala plena) de extração de K pela parte aérea do capim-vetiver, obtidos nas diferentes porções do sistema, especialmente para as seguintes datas de corte: 02/06, 02/07, 02/08 e 02/09. Dessa maneira, entende-se que os modelos obtidos neste trabalho possam ser utilizados na estimativa da extração de K pelo capim-vetiver, ao longo do comprimento dos SACs-EHSS, desde que sejam conhecidos os valores de CE na água residuária em tratamento ao longo desse sistema.

Em relação à extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85, nota-se a mesma tendência obtida em relação aos outros nutrientes (N e P), ou seja, os modelos obtidos nos protótipos de SACs-EHSS superestimaram a extração de K pela parte aérea das plantas, em SAC-EHSS operados em escala plena, em que o afluente era o esgoto sanitário. Observa-se que as estimativas obtidas utilizando-se o modelo representativo do período de baixas temperaturas foram superiores aos valores reais de extração para todos os meses avaliados, o qual pode ser utilizado, neste caso, para representar o potencial máximo de extração de K pela parte aérea do

capim-tifton 85, quando cultivado no SAC-EHSS utilizado no tratamento de esgoto sanitário, independente do período do ano.

De acordo com os valores de extração de K pela parte aérea do capim-tifton 85 obtidos por Jesus (2016), $3,3 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ de K no inverno e $12,9 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$ de K na primavera, pode-se concluir que os modelos de estimativa obtidos neste trabalho apresentam grande potencial de utilização. No entanto, diversos autores (MATOS *et al.*, 2008; MATOS *et al.*, 2010; FIA *et al.*, 2011) obtiveram extração máxima de K pelo capim-tifton 85 de $5,46 \text{ g m}^{-2} \text{ mês}^{-1}$, considerando-se que os afluentes utilizados por esses autores possuíam CE superior à do esgoto sanitário, fica evidente que os modelos de estimativa da extração de K, realmente, superestimam os valores reais no tratamento dessa água residuária.

A partir dos resultados obtidos de capacidade de extração de nutrientes/poluentes via parte aérea dos capins vetiver e tifton 85, quando cultivados em protótipos de SACs-EHSS, verifica-se a existência de um grau de incerteza nos modelos gerados, consequência do empirismo inerentes à modelagem desses fenômenos e estimativa dessas variáveis. Entretanto, esses modelos são ferramentas essenciais para entendimento de como as características da água residuária a ser tratada em SACs-EHSS podem afetar a evapotranspiração, a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e a extração de nutrientes/poluentes, via parte aérea, pelas plantas cultivadas nesses sistemas, visto que, as plantas apresentam limitada capacidade de remoção de nutrientes, resultando na estabilização ou até mesmo redução nas taxas de extração, com o aumento da carga de nutrientes (FIA *et al.*, 2011; FIA *et al.*, 2015; MENDONÇA *et al.*, 2017).

Embora tenha sido verificado que decisões baseadas apenas nos modelos obtidos neste trabalho, em protótipos, podem apresentar grandes desvios em relação às condições reais de campo, esses servem de balizamento para estimativas de projetos futuros, assim como, o conhecimento de como as variáveis avaliadas variam ao longo dos SACs-EHSS. Outra possibilidade é estimar em campo, a partir do monitoramento da CE, variável de mais fácil quantificação, a extração de poluentes nas condições de operação dos SACs-EHSS, já que as características das águas residuárias podem apresentar variações ao longo do tempo.

6. CONCLUSÃO

- A ET_C do capim-vetiver independe dos valores de CE na solução nutritiva, podendo ser estimada por valores médios de K_C obtidos para as diferentes fases de desenvolvimento

vegetativo da cultura. Em relação ao capim-tifton 85, os valores de K_C apresentaram comportamento quadrático em função da CE, sendo obtidos modelos comuns de estimativa de K_C para as diferentes épocas do ano;

- A produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e a capacidade de extração de N, P e K pelo capim-vetiver aumentaram linearmente com o aumento da CE na solução nutritiva. No que se refere ao capim-tifton 85, foram ajustados modelos polinomiais quadráticos de produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e de extração de N, P e K pelo capim-tifton 85, em função da CE.
- A validação dos valores de K_C do capim-vetiver, obtidos nos protótipos de SACs-EHSS, foi realizada de forma satisfatória. Em contrapartida, os valores de K_C do capim-tifton 85 obtidos no sistema de tratamento construído em escala plena foram superiores aos obtidos nos protótipos de SACs-EHSS.
- Os modelos de estimativa da produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e da extração de K pelo capim-vetiver, foram validados de maneira satisfatória. No entanto, a capacidade de extração de N e P estimada para a parte aérea do capim-vetiver foi inferior a real observada nos SACs-EHSS construídos em escala plena. Com relação ao capim-tifton 85, os modelos superestimaram a produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e a capacidade de extração de N, P e K pelo referido capim.
- As diferentes idades das plantas cultivadas nos protótipos de SACs-EHSS e no SAC-EHSS em escala plena, foram fator de grande importância nos modelos ajustados, o que repercutiu na sua validação. Apesar disso, os valores estimados de K_C , produtividade de biomassa vegetal seca da parte aérea e extração de N, P e K, obtidos utilizando-se os modelos ajustados aos dados gerados nos protótipos de SACs-EHSS, cultivados com os capins vetiver e tifton 85, podem ser utilizados como fonte preliminar de informação no projeto e operação desses sistemas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. **FAO, Rome**, v. 300, n. 9, 1998.

AMORIM, F.; FIA, R.; PASQUALIN, P. P.; OLIVEIRA, L. F. C.; SILVA, J. R. M. Capim-tifton 85 cultivado em sistema alagado construído com elevadas taxas de aplicação. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 23, n. 3, p. 241-250, 2015.

ANDA, A.; SILVA, J. A. T. D.; SOOS, G. Evapotranspiration and crop coefficient of common reed at the surroundings of Lake Balaton, Hungary. **Aquatic Botany**, v. 116, p. 53-59, 2014.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition**. Washington: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2012. 1496p.

AVELAR, F. F.; MATOS, A. T.; JÚNIOR, A. R. L.; PORTES, M. R.; GUALHANO, D. S. Desempenho agrônômico de mentha aquática cultivada em sistemas alagados construídos sob diferentes taxas de aplicação orgânica. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 2, p. 322-330, 2016.

BEEBE, D. A.; CASTLE, J. W.; MOLZ, F. J.; RODGERS, J. H. Effects of evapotranspiration on treatment performance in constructed wetlands: Experimental studies and modeling. **Ecological Engineering**, v. 71, p. 394-400, 2014.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação - 8^a Edição**. Viçosa, MG: Editora UFV, 2008. 625p.

BIAŁOWIEC, A.; ALBUQUERQUE, A.; RANDERSON, P. F. The influence of evapotranspiration on vertical flow subsurface constructed wetland performance. **Ecological Engineering**, v. 67, p. 89-94, 2014.

BORGES, A. C.; ZAPAROLI, B. R.; DE MATOS, A. T.; MIRANDA, S. T.; MOREIRA, A. R.; RANIERI, E. Potential for denitrification in sequencing batch constructed wetlands cultivated with *T. latifolia* and *C. zizanioides*. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 12, p. 5464-5472, 2016.

BORIN, M.; MILANI, M.; SALVATO, M.; TOSCANO, A. Evaluation of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. evapotranspiration in Northern and Southern Italy. **Ecological Engineering**, v. 37, n. 5, p. 721-728, 2011.

BRANDON LOTT, R.; HUNT, R. J. Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands. **Wetlands**, v. 21, n. 4, p. 614-628, 2001.

BRASIL, M. D. S.; MATOS, A. T. D. Avaliação de aspectos hidráulicos e hidrológicos de sistemas alagados construídos de fluxo subsuperficial. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 323-328, 2008.

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, p. 203-214, 2016.

CARR, G. M.; DUTHIE, H. C.; TAYLOR, W. D. Models of aquatic plant productivity: a review of the factors that influence growth. **Aquatic Botany**, v. 59, n. 3-4, p. 195-215, 1997.

CHAZARENC, F.; NAYLOR, S.; COMEAU, Y.; MERLIN, G.; BRISSON, J. Modeling the Effect of Plants and Peat on Evapotranspiration in Constructed Wetlands. **International Journal of Chemical Engineering**, v. 2010, p. 1-6, 2010.

COGO, C. M. **Crescimento, produtividade e consumo de solução nutritiva em diferentes concentrações pelo tomateiro cultivado em casca de arroz in natura**. 2009. 56p. Tese (Doutorado em Sistemas de Produção Agrícola Familiar) - Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2009.

COMETTI, N. N.; FURLANI, P. R.; RUIZ, H. A.; FERNANDES FILHO, E. I. Soluções Nutritivas: Formulação e Aplicações. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição Mineral de Plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. cap. IV, p.90-112.

DEE, S. M.; AHN, C. Plant tissue nutrients as a descriptor of plant productivity of created mitigation wetlands. **Ecological Indicators**, v. 45, p. 68-74, 2014.

DELIS, P. C.; EFFENDI, H.; KRISANTI, M.; HARIYADI, S. Treatment of aquaculture wastewater using *Vetiveria zizanioides* (Liliopsida, Poaceae). **AAEL Bioflux**, v. 8, n. 4, p. 616-625, 2015.

DREIFUS, T. V. **Tratamento de águas residuárias por alagados construídos de fluxo subsuperficial horizontal, utilizando vetiver (*chrysopogon zizanioides*): Avaliação e desempenho de três leitos distintos**. 2012. 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Bauru, SP, 2012.

DREXLER, J. Z.; SNYDER, R. L.; SPANO, D.; PAW U, K. T. A review of models and micrometeorological methods used to estimate wetland evapotranspiration. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 11, p. 2071-2101, 2004.

FERNANDES, D. S. F.; HEINEMANN, A. B.; AMORIM, A. O. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 2010.

FIA, F. R. L.; MATOS, A. T.; FIA, R.; BORGES, A. C.; ABREU, E. C. Influência da carga de nutrientes e da espécie cultivada na remoção de K, Na, Cu e Zn da água residuária da suinocultura tratada em sistemas alagados construídos. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 10, n. 3, p. 542-553, 2015.

FIA, F. R. L.; MATOS, A. T.; FIA, R.; BORGES, A. C.; CECON, P. R. EFEITO DA VEGETAÇÃO EM SISTEMAS ALAGADOS CONSTRUÍDOS TRATANDO ÁGUAS RESIDUÁRIAS DA SUINOCULTURA. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 1-9, 2017.

FIA, F. R. L.; MATOS, A. T.; FIA, R.; LAMBERT, T. F.; PIMENTEL DE MATOS, M. Remoção de nutrientes por *Typha latifolia* e *Cynodon* spp. cultivadas em sistemas alagados construídos/Nutrients removal by *Typha latifolia* and *Cynodon* spp. grown in constructed wetlands. **Revista Ambiente & Água**, v. 6, n. 1, p. 77-89, 2011.

FIA, R.; BOAS, R. B. V.; CAMPOS, A. T.; FIA, F. R.; SOUZA, E. G. D. Removal of nitrogen, phosphorus, copper and zinc from swine breeding waste water by bermudagrass and cattail in constructed wetland systems. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 1, p. 112-113, 2014.

FLORENÇA, M. S. S.; MATOS, A. T.; PINTO, F. R. M.; PIMENTEL DE MATOS, M. Evapotranspiração em sistemas alagados construídos cultivados com capim elefante cv. Napier (*pennisetum purpureum*). In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007, Bonito. *Anais...* Bonito: CONBEA, 2007.

FREEDMAN, A.; GROSS, A.; SHELEF, O.; RACHMILEVITCH, S.; ARNON, S. Salt uptake and evapotranspiration under arid conditions in horizontal subsurface flow constructed wetland planted with halophytes. **Ecological Engineering**, v. 70, p. 282-286, 2014.

GAO, J.; WANG, W.; GUO, X.; ZHU, S.; CHEN, S.; ZHANG, R. Nutrient removal capability and growth characteristics of *Iris sibirica* in subsurface vertical flow constructed wetlands in winter. **Ecological Engineering**, v. 70, p. 351-361, 2014.

GARCIA, G. O.; RIGGO, M. M.; CECÍLIO, R. A.; REIS, E. F.; BERTOSI, A. P. A. Massa seca e extração de nutrientes por duas forrageiras fertirrigadas com esgoto doméstico tratado. **Bioscience Journal**, v. 31, n. 1, p. 215-226, 2015.

GONDIM, A. R. O.; FLORES, M. E. P.; MARTINEZ, H. E. P.; FONTES, P. C. R.; PEREIRA, P. R. G. Condutividade elétrica na produção e nutrição de alface em sistema de cultivo hidropônico NFT. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 6, p. 894-904, 2010.

GUIMARAES, G. P.; ALVES, D. G.; JORGE, M. F.; NASCENTES, A. L.; PINHO, C. F.; SILVA, L. D. B.; CARLOS, A.; MELO, A. C. F. Removal of nitrogen and phosphorus from cattle farming wastewater using constructed wetland system. **African Journal of Agricultural Research**, v. 11, n. 44, p. 4542-4550, 2016.

HEADLEY, T. R.; DAVISON, L.; HUETT, D. O.; MÜLLER, R. Evapotranspiration from subsurface horizontal flow wetlands planted with *Phragmites australis* in sub-tropical Australia. **Water Research**, v. 46, n. 2, p. 345-354, 2012.

HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water-culture method for growing plants without soil. **Circular - California Agricultural Experiment Station**, v. 347, n. 2nd edit, 1950.

JESUS, F. L. F. **Desempenho e influência dos capins tifton 85 (*Cynodon spp.*) e vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) no tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos**. 2016. 93p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

KADLEC, R. H. Water temperature and evapotranspiration in surface flow wetlands in hot arid climate. **Ecological Engineering**, v. 26, n. 4, p. 328-340, 2006.

KADLEC, R. H.; KNIGHT, R. L. **Treatment wetlands**. Boca Raton ; London: CRC, 1996. 893p.

KADLEC, R. H.; WALLACE, S. D. **Treatment wetlands**. 2. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2009. 1016p.

KEIZER-VLEK, H. E.; VERDONSCHOT, P. F. M.; VERDONSCHOT, R. C. M.; DEKKERS, D. The contribution of plant uptake to nutrient removal by floating treatment wetlands. **Ecological Engineering**, v. 73, p. 684-690, 2014.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres, 1985. 492p.

KUMAR, R.; JAT, M. K.; SHANKAR, V. Methods to estimate irrigated reference crop evapotranspiration - a review. **Water Sci Technol**, v. 66, n. 3, p. 525-535, 2012.

- LIOLIOS, K. A.; MOUTSOPOULOS, K. N.; TSIHRINTZIS, V. A. Comparative modeling of HSF constructed wetland performance with and without evapotranspiration and rainfall. **Environmental Processes**, v. 1, n. 2, p. 171-186, 2014.
- LIRA, R. M. D.; SILVA, G. F. D.; SANTOS, A. N. D.; ROLIM, M. M. Production, water consumption and nutrient content of Chinese cabbage grown hydroponically in brackish water. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 3, p. 497-505, 2015.
- MACIEL, M. P.; SOARES, T. M.; GHEYI, H. R.; REZENDE, E. P.; OLIVEIRA, G. X. Produção de girassol ornamental com uso de águas salobras em sistema hidropônico NFT. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 165-172, 2012.
- MARTINEZ, H. E. P.; CLEMENTE, J. M. **O Uso do Cultivo Hidropônico de Plantas em Pesquisa**. Viçosa: Editora UFV, 2011. 76p.
- MATOS, A. T. **Manual de Análise de Resíduos Sólidos e Águas Residuárias**. Viçosa: Editora UFV, 2015. 149p.
- MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; LO MONACO, P. A.; SARMENTO, A. P.; PIMENTEL DE MATOS, M. Capacidade extratora de plantas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias de laticínios. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 14, n. 12, p. 1311-1317, 2010.
- MATOS, A. T.; ABRAHÃO, S. S.; PEREIRA, O. G. Desempenho agrônômico de capim tifton 85 (*cynodon spp*) cultivado em sistemas alagados construídos utilizados no tratamento de água residuária de laticínios. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 3, n. 1, p. 43-53, 2008.
- MATOS, A. T.; FREITAS, W. S.; LO MONACO, P. A. V. Capacidade extratora de diferentes espécies vegetais cultivadas em sistemas alagados utilizados no tratamento de águas residuárias da suinocultura. **Revista Ambiente & Água**, v. 4, n. 2, p. 31-45, 2009.
- MENDONÇA, H. V.; MELO RIBEIRO, C. B.; NOGUEIRA, K. C. C. Remoção de matéria orgânica e nutrientes de águas residuais de laticínios em sistemas alagados construídos. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 12-22, 2017.
- MILANI, M.; TOSCANO, A. Evapotranspiration from pilot-scale constructed wetlands planted with *Phragmites australis* in a Mediterranean environment. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 48, n. 5, p. 568-580, 2013.
- MUSYIMI, D. M.; NETONDO, G. W.; OWUOR, B.; GICHIMU, B. M. Growth and nutrient uptake among three wetland plant species occurring in Lake Victoria basin in Kenya. **Agriculture and biology journal of north america**, v. 1, n. 3, p. 250-264, 2010.
- NAZÁRIO, A. A.; GARCIA, G. O.; FIALHO DOS REIS, E.; MENDONÇA, E. S.; MELLINE, J. G. B. Acúmulo de nutrientes por forrageiras cultivadas em sistema de escoamento superficial para tratamento de esgoto doméstico. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 9, n. 1, p. 97-108, 2014.
- PAPAEVANGELOU, V. A.; GIKAS, G. D.; STEFANAKIS, A. I.; TSIHRINTZIS, V. A. Estimation of evapotranspiration in pilot-scale horizontal subsurface flow constructed

wetlands. In: PROTECTION AND RESTORATION OF THE ENVIRONMENT, 2010, Corfu, Greece. *Proceedings of the International Conference...* Corfu, Greece, 2010. p.5-9.

PAPAEVANGELOU, V. A.; TSIHRINTZIS, V. A.; GIKAS, G. D. Quantification of constructed wetland evapotranspiration using lysimeters. **Fresenius Environmental Bulletin**, v. 21, n. 10a, p. 3083-3092, 2012.

PAULA, L.; ROLIM, M. M.; NETO, E. B.; SOARES, T. M.; PEDROSA, E. M. R.; SILVA, Ê. F. F. Crescimento e nutrição mineral de milho forrageiro em cultivo hidropônico com soro de leite bovino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 9, p. 931-939, 2011.

PAULUS, D.; PAULUS, E.; NAVA, G. A.; ANDRADE MOURA, C. Crescimento, consumo hídrico e composição mineral de alface cultivada em hidroponia com águas salinas. **Revista Ceres**, v. 59, n. 1, p. 110-117, 2012.

PEDESCOLL, A.; SIDRACH-CARDONA, R.; SÁNCHEZ, J. C.; BÉCARES, E. Evapotranspiration affecting redox conditions in horizontal constructed wetlands under Mediterranean climate: Influence of plant species. **Ecological Engineering**, v. 58, p. 335-343, 2013.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A. V.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.

PEREIRA, R. A.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: Fundag, 2013. 323p.

PINTO, F. R. M.; MATOS, A. T.; PIMENTEL DE MATOS, M. Evapotranspiração em sistemas alagados construídos cultivados com capim tifton 85 (*cynodon ssp.*). In: XXXVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007, Bonito. *Anais...* Bonito: CONBEA, 2007.

PORTELA, I. P.; PEIL, R. M. N.; ROMBALDI, C. V. Efeito da concentração de nutrientes no crescimento, produtividade e qualidade de morangos em hidroponia. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 266-273, 2012.

PRATA, R. C. C.; MATOS, A. T. D.; CECON, P. R.; MONACO, P. A. V. L.; PIMENTA, L. A. Tratamento de esgoto sanitário em sistemas alagados construídos cultivados com lírio-amarelo. **Engenharia Agrícola**, v. 33, p. 1144-1155, 2013.

RAHARJO, S.; SUPRIHATIN, S.; INDRASTI, N. S.; RIANI, E. Phytoremediation of vaname shrimp (*Litopenaeus vannamei*) waste water using vetiver grass system (*Chrysopogon zizanioides*, L) in flow water surface-constructed wetland. **AAEL Bioflux**, v. 8, n. 5, p. 796-804, 2015.

RAMOS, N. D. F. S.; BORGES, A. C.; GONÇALVES, G. C.; MATOS, A. T. Tratamento de águas residuárias de suinocultura em sistemas alagados construídos, com *Chrysopogon zizanioides* e *Polygonum punctatum* cultivadas em leito de argila expandida. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 123-132, 2017.

RASHED, A. A. Assessment of aquatic plants evapotranspiration for secondary agriculture drains (case study: Edfina drain, Egypt). **The Egyptian Journal of Aquatic Research**, v. 40, n. 2, p. 117-124, 2014.

SANCHES, A. C.; SOUZA, D. P.; FERREIRA JESUS, F. L.; MENDONÇA, F. C.; MAFFEI, R. G. Consumo de água de forrageiras tropicais no período de formação de pastagem. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 2, p. 1291-1301, 2017.

SANCHEZ, C. A.; CHILDERS, D. L.; TURNBULL, L.; UPHAM, R. F.; WELLER, N. Aridland constructed treatment wetlands II: Plant mediation of surface hydrology enhances nitrogen removal. **Ecological Engineering**, v. 97, p. 658-665, 2016.

SANTANA, M. J.; WACHSMUTH, R.; SGOBI, M. A.; ALMEIDA, F. S. Evapotranspiração e coeficiente de cultura do tifton-85 em Uberaba, MG. **Global Science and Technology**, v. 9, n. 3, p. 39-50, 2016.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal - 5ª Edição**. Porto Alegre: Editora Artmed, 2013. 820p.

TOSCANO, A.; MARZO, A.; MILANI, M.; CIRELLI, G. L.; BARBAGALLO, S. Comparison of removal efficiencies in Mediterranean pilot constructed wetlands vegetated with different plant species. **Ecological Engineering**, v. 75, p. 155-160, 2015.

TUTTOLOMONDO, T.; LETO, C.; LA BELLA, S.; LEONE, R.; VIRGA, G.; LICATA, M. Water balance and pollutant removal efficiency when considering evapotranspiration in a pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetland in Western Sicily (Italy). **Ecological Engineering**, v. 87, p. 295-304, 2016.

TUTTOLOMONDO, T.; LICATA, M.; LETO, C.; LEONE, R.; LA BELLA, S. 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, p. 79-92, 2015.

UCKER, F. E.; ALMEIDA, R. A. Utilização do capim vetiver na remoção de nutrientes do esgoto doméstico. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. 1, n. 2, p. 267-275, 2013.

UCKER, F. E.; ALMEIDA, R. A.; KEMERICH, P. D. C. Remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto sanitário em um sistema de alagados construídos utilizando o capim vetiver. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 3, p. 87-98, 2012.

VIERITZ, A.; TRUONG, P.; GARDNER, T.; SMEAL, C. Modelling Monto vetiver growth and nutrient uptake for effluent irrigation schemes. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON VETIVER AND EXHIBITION, 2003, Guangzhou, China. *Proceedings of the Conference...* Guangzhou, China, 2003.

VYMAZAL, J. Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. **Sci Total Environ**, v. 380, n. 1-3, p. 48-65, Jul 15 2007.

WALLACE, S. D.; NIVALA, J. A.; PARKIN, G. F. Relationship between evapotranspiration and pan evaporation in cold-climate subsurface-flow constructed. In: IWA SPECIALIST

GROUP ON THE USE OF MACROPHYTES IN WATER POLLUTION CONTROL, 2005, *Short Communication*. 2005.

WELLER, N. A.; CHILDERS, D. L.; TURNBULL, L.; UPHAM, R. F. Aridland constructed treatment wetlands I: Macrophyte productivity, community composition, and nitrogen uptake. **Ecological Engineering**, v. 97, p. 649-657, 2016.

XU, S.; MA, T.; LIU, Y. Application of a multi-cylinder evapotranspirometer method for evapotranspiration measurements in wetlands. **Aquatic Botany**, v. 95, n. 1, p. 45-50, 2011.

YEBOAH, S. A.; ALLOTEY, A. N. M.; BINEY, E. Purification of industrial wastewater with vetiver grasses (*vetiveria zizanioides*): The case of food and beverages wastewater in ghana. **Asian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 2, n. 2, p. 1-14, 2015.