CÉLIA SILVA DOS SANTOS

REÚSO DE ÁGUA NA CULTURA DO MILHO EM SOLOS REPRESENTATIVOS DA BACIA DO RIO IPOJUCA

RECIFE-PE, 2019

CÉLIA SILVA DOS SANTOS

REÚSO DE ÁGUA NA CULTURA DO MILHO EM SOLOS REPRESENTATIVOS DA BACIA DO RIO IPOJUCA

Tese submetida à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Pernambuco-UFRPE, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro

RECIFE-PE, 2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Centra, Recife-PE, Brasil

S237r Santos, Célia Silva dos
Reúso de água na cultura do milho em solos representativos da bacia do rio Ipojuca / Célia Silva dos Santos. – 2019.
202 f.: il.

Orientador: Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Recife, BR-PE, 2019.
Inclui referências.

1. Água residuária 2. Conservação de água e solo 3. *Zea mays* L. I. Montenegro, Abelardo Antônio de Assunção, orientador. II. Título

CDD 630

CÉLIA SILVA DOS SANTOS

REÚSO DE ÁGUA NA CULTURA DO MILHO EM SOLOS REPRESENTATIVOS DA BACIA DO RIO IPOJUCA

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

Tese defendida e aprovada pela Banca Examinadora em: 31/07/2019

COMISSÃO JULGADORA

ORIENTADOR:

_____

Prof.º Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (UFRPE)

BANCA EXAMINADORA

_____

Prof.º Dr. Ênio Farias de França e Silva (UFRPE)

_____

Prof.º Dr. Edivan Rodrigues de Souza (UFRPE)

_____

Dr. José Nildo Tabosa (IPA)

_____

Prof.º Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos (UFAL)

À minha mãe Josefa Maria (*in memoriam*) e ao meu pai Derivaldo Santos, pelos ensinamentos, amor, incentivo e confiança, sempre apoiando as minhas decisões.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por me guiar, abençoar e interceder no meu caminho e pela oportunidade de estar concluído uma etapa tão importante da minha vida.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela formação e estrutura oferecida para o desenvolvimento deste trabalho, como também ao coordenador Professor Ênio F. F. Silva, ao vice coordenador Mário Rolim e a Secretária Nádia Cassemiro.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante o período de realização do doutorado.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) pelo apoio ao fomento da pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Abelardo Montenegro, pela paciência, conselhos, orientação e confiança na execução desta Tese de Doutorado, minha sincera admiração!

Aos membros da banca examinadora: Prof. Dr. Ênio Farias de França e Silva, Prof. Dr. Edivan Rodrigues de Souza, Dr. José Nildo Tabosa e o Prof. Dr. Márcio Aurélio Lins dos Santos, pela significativa contribuição e presteza sempre que solicitados.

À minha mãe Josefa Maria (*In memoriam*), porque Deus escolhe pessoas para transformar nossas vidas e a senhora foi uma delas. Obrigada por TUDO!

Ao meu pai Derivaldo Santos, pelo seu amor, apoio incondicional, compreensão e paciência que teve durante todo este tempo e que, mesmo à distância, sempre me apoiou em todos os caminhos e decisões.

Aos meus sobrinhos queridos Rívia Silveira e Thyago Santos, que sempre me motivaram e acreditaram que tudo iria dá certo. Obrigada por estarem sempre comigo!

Ao meu noivo e companheiro Felício Cavalcante, pelo seu amor, incentivo e compreensão, por sempre me motivar pessoalmente e profissionalmente e que mesmo distante se fez sempre presente.

À minha amiga irmã de longas datas, Tácia Michelle, por todo incentivo, amizade, conselhos e por sempre me motivar. Obrigada por todo amor e carinho!

Aos amigos/irmãos a quem vou levar da Rural para vida: Ana Cláudia, Daniella, Diego, Jessyka, Kátia e Wanderson, pessoas formidáveis e que terão para sempre todo meu respeito e gratidão. Obrigada por todo amor e companheirismo!

A todos amigos da pós-graduação em Engenharia Agrícola, em especial ao: Daniel Dantas, Monalisa Soares, Sirleide Menezes e José Edson pela presteza nas análises de laboratório e reta final do doutorado. Vocês foram fundamentais!

À professora Laércia, por todo apoio, conselho e abraço dado nos dias mais precisos. Obrigada por seu cuidado, por sua luz e seu amor!

À Luana Mayara, pela ajuda e incentivo nesta reta final da Tese. Obrigada pelos momentos compartilhados!

Aos colegas que fizeram e fazem parte do LAS (Laboratório de Água e Solo) pela amizade, momentos de aprendizagem, descontração, trabalhos de campo, laboratório, participação em congressos: Adriana Guedes, Adriano Normandia, Daniella Pereira, Hélio Lopes, José Roberto, Liliane Pinheiro, Robertson Fontes, Valdemir Junior, Ailton Carvalho, Fred Mikhail, Frederico Lins, Iug Lopes e Thayná Almeida.

Aos Pibic's do LAS: Kátia, Beatriz, Andeson, Talita, Evellyn, Raul. Gratidão a todos vocês pela ajuda e colaboração, muito obrigada por todos os momentos que passamos juntos, por toda palavra de conforto nos momentos difíceis e pelas risadas constantes ao longo desse tempo. Espero ter contribuído com vocês, foram longos dias, mas de muita dedicação e esforço que sem vocês nada teria sido possível. Minha eterna gratidão, contem sempre comigo!

Ao Senhor Cícero, pessoa responsável pela manutenção da Estação de Tratamento de Esgoto Doméstico em Mutuca-PE. Obrigada por sempre estar presente nos momentos que precisei, pela ajuda e pela humanidade, pessoa simples e de grande valor!

Ao coordenador do setor de transporte Zeca e coordenadora do almoxarifado Nilda da UFRPE, pela presteza e humanidade nos momentos difíceis.

Ao prof. Dr. José Amilton Santos Junior pela orientação e por ter cedido o espaço experimental e a contribuição de Rodrigo Monterrazo e Pedro Fagner para montagem e condução do experimento. Pessoas de muita dedicação e trabalho, obrigada pelo apoio!

À todas as outras pessoas que não foram citadas aqui, mas que de alguma forma colaboraram com este trabalho. Minha gratidão e MUITO OBRIGADA!

Esta Tese recebeu apoio dos projetos APQ 0913-5.03/15 e APQ 0300-5.03/17, da FACEPE. (Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco).

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(**Marthin Luther King**)

Salmo 23

O Senhor é meu Pastor, e nada me faltará
Deitar-me faz em verdes pastos
Guia-me as águas tranquilas
Refrigera minha alma
Guia-me pelas veredas da justiça por amor do seu nome
Ainda que eu andasse pelo vale da sombra da morte
não temeria mal algum porque estás comigo
Tua vara e teu cajado me consolam
Preparas-me uma mesa na presença dos meus inimigos
Unges minha cabeça com óleo
e o meu cálice transborda
Certamente que a bondade e a misericórdia me seguirão
todos os dias da minha vida
e habitarei na casa do Senhor para todo sempre
.
Amém!

RESUMO GERAL

Santos, Célia Silva dos. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Julho de 2019. **Reúso de água na cultura do milho em solos representativos da bacia do Rio Ipojuca**. Orientador: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.

Dada a importância social e econômica do reúso agrícola no mundo, a adoção de práticas de manejo de água e solo e a mitigação dos impactos ambientais gerados por esta atividade são urgentes e possuem grande relevância ambiental. Nesse sentido, objetivou-se investigar a influência do reúso de água nas características de crescimento, produção, nutricionais, fisiológicas e alterações nos atributos químicos do solo cultivado com a cultura do milho, como também as alterações da umidade do solo utilizando modelagem matemática. O experimento foi conduzido em condições de ambiente protegido na área experimental do Campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE/DEAGRI, Campus Recife) durante 2 ciclos da cultura do milho. O delineamento experimental do 1º ciclo foi em blocos ao acaso, com 05 tratamentos e 05 repetições, totalizando 25 unidades experimentais. Os tratamentos foram compostos com as diferentes concentrações de água residuária diluída com água de abastecimento nas porcentagens: T1 – 100% de água residuária (AR), T2 - 75% AR + 25% de água de abastecimento (AB); T3 - 50% AR + 50% AB; T4 - 25% AR + 75% AB; T5 – 100% AB + adubação convencional, em Planossolo Háplico. No 2º ciclo realizou-se o experimento com esquema fatorial (5 x 2) + 2, com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram em cinco lâminas de reposição da ETc: (80, 90, 100, 110 e 120%) de água residuária, associados a dois tipos de solos (Planossolo Háplico – Solo 1 e Neossolo Regolítico – Solo 2), mais duas testemunhas, ambas irrigadas com água de abastecimento, avaliado até os 80 dias após a semeadura (DAS). Conclui-se que a utilização de água residuária constitui como alternativa potencialmente importante no desenvolvimento do milho quando irrigado com maiores concentrações associada com água de abastecimento. O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de forma satisfatória a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para os diferentes tipos de solo. O estado nutricional do milho foi influenciado pelo tipo de água de irrigação, apresentando melhor equilíbrio nutricional quando foi irrigado com água residuária. O uso de lâminas de 110 e 120% de reposição da ETc ocasionou menores valores de Na total, de PST, de Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis e de salinidade do solo (CEes).

Palavras-chave: água residuária conservação de água e solo, *Zea mays* L.

GENERAL ABSTRACT

Santos, Célia Silva dos. Rural Federal University of Pernambuco. July 2019. **Water reuse in corn crop in soil representative of the Ipojuca River basin**. Advisor: Prof. Dr. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro.

Due to the social and economic importance of agricultural reuse in the world, the adoption of water and soil management practices and the mitigation of the environmental impacts generated by such activity are urgent and have great environmental relevance. The objective with study was to investigate the influence of water reuse on growth, production, nutritional and physiological characteristics of maize (*Zea mays* L.) crop, changes in soil chemical attributes, as well as changes in soil moisture using mathematical modeling. The experiment was conducted under protected environment conditions at the Campus of the Federal Rural University of Pernambuco (UFRPE / Campus Recife) for 2 cycles of maize. The experimental design of the 1st cycle was in randomized blocks, with 5 treatments and 5 repetitions, totaling 25 experimental units. The treatments were composed with the different concentrations of diluted wastewater with fresh water in the percentages: T1 - 100% of wastewater (AR), T2 - 75% AR + 25% of water supply (AB); T3 - 50% AR + 50% AB; T4 - 25% AR + 75% AB; T5 - 100% AB + chemical fertilization, in Haplic Planosol. For the 2nd cycle, the experiment was carried out with a factorial scheme (5 x 2) + 2, with 4 replications, totaling 48 experimental units. The treatments consisted of five ETc replacement depths: 80, 90, 100, 110 and 120% of wastewater, associated to two soils types (Haplic Planosol - Soil 1 and Entisol - Soil 2), plus two controls both irrigated with fresh water, evaluated up to 80 days after sowing (DAS). It is concluded that the wastewater use constitutes a potentially important alternative for the maize development when irrigated with higher concentrations of wastewater associated with fresh water. The Hydrus-1D model was able to satisfactorily simulate the soil moisture dynamics over time for the different soil types and the respective soil cover conditions. The nutritional status of maize was influenced by the type of irrigation water, presenting better nutritional balance when irrigated with wastewater. The use of irrigation depths with leaching fraction produced lower values of total Na, PDT, Ca^{2+} and Mg^{2+} solubles and soil salinity (ECs).

Keywords: water reuse, water and soil conservation, *Zea mays* L.

SUMÁRIO

RESUMO GERAL 9
GENERAL ABSTRACT 10
CAPÍTULO I –Introdução geral e Revisão de literatura 14
1 INTRODUÇÃO... 15
2 OBJETIVO GERAL 16
2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO..... 16
3 HIPÓTESE..... 16
4 REVISÃO DE LITERATURA..... 17
4.1.1 Aspectos gerais e Socio-econômicos..... 17
4.1.2. Questões climáticas e edáficas..... 18
4.1.3. Estação demonstrativa de tratamento de esgoto e reúso hidroagrícola 19
4.2. A cultura do milho 20
4.2.1. Origem, Taxonomia e Aspectos morfofisiológicos 22
4.2.2. Exigência Hídrica e Nutricional 25
4.3. Reúso de água na agricultura 26
4.3.1 Impactos da aplicação de água residuária sobre solo e plantas 28
4.4. Balanço de sais no solo 30
4.5. Modelagem matemática 31
REFERÊNCIAS..... 32
CAPÍTULO II – Desenvolvimento e consumo hídrico do milho irrigado com diferentes concentrações de água residuária..... 40
RESUMO..... 41
ABSTRACT..... 42
1 INTRODUÇÃO 43
2 MATERIAL E MÉTODOS 44
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 50
4 CONCLUSÕES 62
REFERÊNCIAS..... 63
CAPÍTULO III – Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes coberturas em campo e ambiente protegido..... 69
RESUMO..... 70

ABSTRACT.....71
1 INTRODUÇÃO.....71
2 MATERIAL E MÉTODOS.....73
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....82
4 CONCLUSÕES.....95
REFERÊNCIAS.....95
CAPÍTULO IV – Estado nutricional e produção de biomassa do milho forrageiro irrigado com água residuária em solos representativos da bacia do rio Ipojuca-PE.....100
RESUMO.....101
ABSTRACT.....102
1 INTRODUÇÃO.....103
2 MATERIAL E MÉTODOS.....104
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....109
4 CONCLUSÕES.....130
REFERÊNCIAS.....131
CAPÍTULO V – Relações hídricas, trocas gasosas e fluorescência da clorofila do milho irrigado com água residuária em diferentes solos da bacia do rio Ipojuca-PE.....138
RESUMO.....139
ABSTRACT.....140
1 INTRODUÇÃO.....141
2 MATERIAL E MÉTODOS.....143
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....149
4 CONCLUSÕES.....167
REFERÊNCIAS.....168
CAPÍTULO VI – Atributos químicos de diferentes solos cultivado com milho irrigado com água residuária.....171
RESUMO.....172
ABSTRACT.....173
1 INTRODUÇÃO.....174
2 MATERIAL E MÉTODOS.....175
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....181
4 CONCLUSÕES.....197

REFERÊNCIAS.....197
CONSIDERAÇÕES FINAIS 202

CAPÍTULO I

Introdução Geral e Revisão de Literatura

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal pertencente à família Poaceae de destacada importância econômica no Brasil e no mundo. É extensivamente utilizado como alimento humano ou para ração animal, devido às suas qualidades nutricionais. O dado mais antigo da cultura do milho advém sua origem do México, consumido pelos povos americanos desde 5000 a.C., servindo de base para alimentação de Maias, Incas e Astecas, que o cultivavam e o utilizavam também na arte e religião.

O cultivo do milho é bastante intenso nas regiões semiáridas, sendo considerado o segundo cereal mais produzido em área cultivada. Nessas regiões a crise hídrica é um problema de amplo escopo global, sobretudo por causa das baixas precipitações pluviométricas como o semiárido brasileiro, onde se encontra apenas 3,3% dos recursos hídricos do país. Com isso se fazendo necessário a gestão dos recursos hídricos que visa equilibrar a demanda dos usuários e a disponibilidade de água.

Uma das tecnologias para gerenciamento de recursos hídricos é o reúso agrícola que é uma técnica bastante estudada e recomendada por diversos pesquisadores no Brasil e no mundo. Sendo assim, torna-se uma alternativa acessível e sustentável, contribuindo para melhoria da fertilidade do solo, tendo como consequência o incremento da produtividade das culturas e redução dos custos com adubação química.

Porém, o inadequado planejamento do reúso de água pode ocasionar alguns problemas de salinidade do solo decorrente das altas taxas de evaporação e baixa precipitação pluviométrica, e da presença em excesso de nitrato, potássio, sódio e nitrogênio total.

Os efeitos da aplicação de água residuária nas propriedades químicas do solo, só são pronunciados após longo período de aplicação, pelos parâmetros que definem sua composição física e química, pelas condições de clima e pelo tipo de solo. Sabe-se que a limitação principal do uso de águas residuárias na agricultura é a sua composição química (totais de sais dissolvidos, presença de íons tóxicos e concentração relativa de sódio) alterando as características físicas e químicas do solo, como o regime de umidade, aeração, nutrientes, desenvolvimento vegetativo e produtividade das culturas.

O uso planejado de águas residuárias implica em menor necessidade de captação dos recursos hídricos primários e de uma geração menor de efluentes constituindo-se, portanto, em uma estratégia eficaz para a conservação desse recurso natural, em seus aspectos qualitativos e quantitativos.

Nas regiões áridas e semiáridas, a água se tornou um fator limitante para o desenvolvimento urbano, industrial e agrícola. Planejadores e entidades gestoras de recursos hídricos procuram, continuadamente, novas fontes de recursos para complementar a pequena disponibilidade hídrica ainda disponível.

A demanda crescente por água tem feito do reúso planejado da água um tema atual e de grande importância. Nesse sentido, deve-se considerar o reúso de água como parte de uma atividade mais abrangente que é o uso racional ou eficiente da água, o qual compreende também o controle de perdas e desperdícios e a minimização de produção de efluentes e do consumo de água.

2. OBJETIVO GERAL

Investigar a influência do reúso de água de qualidade inferior na cultura do milho, em solos representativos da Bacia do Rio Ipojuca – PE.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desenvolvimento e consumo hídrico do milho irrigado com diluições de água residuária tratada;
- Calibrar e modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Hydrus-1D em condições de campo e ambiente protegido;
- Avaliar o estado nutricional e produção de biomassa sob diferentes lâminas de irrigação com água residuária tratada em diferentes solos;
- Avaliar as relações hídricas, trocas gasosas e fluorescência da clorofila do milho irrigado com lâminas de irrigação com água residuária tratada em diferentes solos;
- Analisar atributos químicos de diferentes solos cultivados com milho irrigado com água residuária tratada.

3. HIPÓTESES

Existe concentração de água residuária ótima para desenvolvimento e consumo hídrico do milho;

O modelo numérico Hydrus responde satisfatoriamente à dinâmica de umidade do solo nos diferentes ambientes investigados, em escala local;

A ciclagem de nutrientes proporcionada pelo reúso, associada a lâminas adequadas de irrigação e de lixiviação, reduz parcial ou totalmente a adubação mineral do milho;

As diferentes lâminas de irrigação de água residuária influencia nas relações hídricas e na fisiologia do milho;

As lâminas de irrigação mais elevadas funcionam como ação mitigadora no acúmulo de sais no solo ao longo do ciclo da cultura do milho.

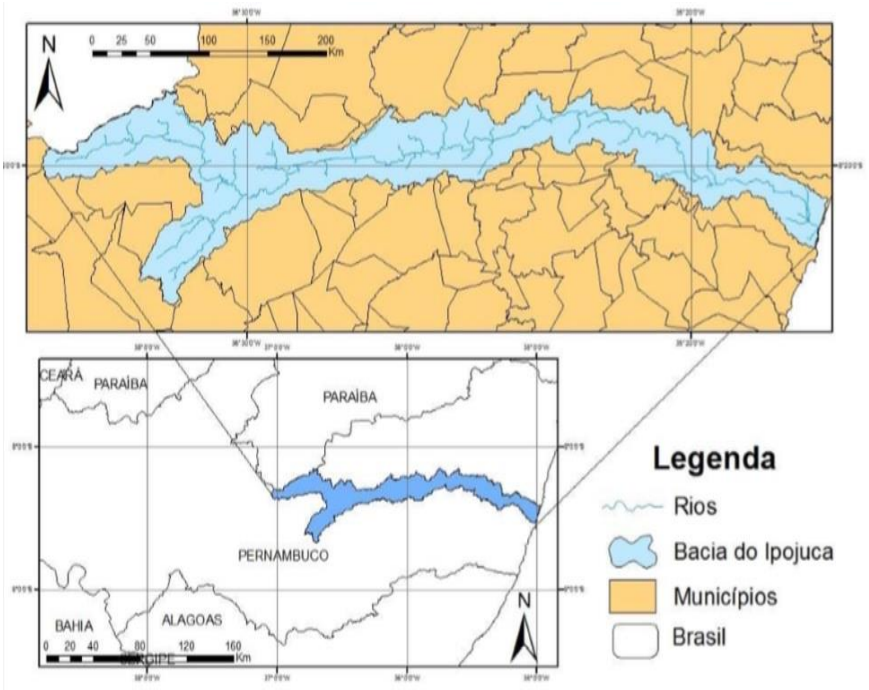
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Caracterização da bacia do Rio Ipojuca

2.1.1. Aspectos Gerais e Socio-econômicos

Referente dados da Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco – CONDEPE/FIDEM (2005), a bacia do rio Ipojuca está localizada no Estado de Pernambuco e situa-se entre os paralelos 8° 09’ 50” S e 8° 40’ 20” S , e os meridianos 34° 57’ 52” W e 37° 02’ 48” W (Figura 1).

Figura 1. Mapa da localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca



Fonte: Deus et al., (2016) (adaptado).

Possui uma superfície de 3.433,58 km², que corresponde cerca de 3,49% da área territorial do Estado de Pernambuco, com perímetro de 749,6 km. Possui divisa ao norte com a bacia hidrográfica do rio Capibaribe, ao sul com as bacias dos rios Una e Sirinhaém, a leste com o

segundo e terceiro grupo de bacias hidrográficas de pequenos rios litorâneos e com o Oceano Atlântico e a oeste com as bacias dos rios Ipanema e Moxotó, e o Estado da Paraíba (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Em relação a economia na porção média da bacia, atividades de pecuária bovina e caprina, e a agricultura de subsistência tem forte expressão econômica nas áreas dos municípios de Sanharó, Pesqueira e Poção, destacando-se expressivas atividades também voltadas para o turismo religioso (romarias e santuários), produção de doces, artesanato (Renda Renascença) (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Os municípios da região da Bacia contribuem com 14,16% (dados de 2002) do Produto Interno Bruto – PIB estadual, destacando-se Ipojuca com 5,63%, Caruaru com 2,43% e Vitória de Santo Antão com 1,13% (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Em relação a Mesorregião do Agreste Pernambucano que é a área de estudo da presente pesquisa, ocorre em grande distribuição áreas de pastagem cultivada ou nativa, contínuas ou não; criação extensiva de bovinos, caprinos e/ou ovinos (pecuária), representando a bacia leiteira; e agricultura, na maioria de subsistência, com plantios de milho, mandioca e feijão, geralmente associados à pequena propriedade ou posse rural (CONDEPE/FIDEM, 2005). Tais atividades apresentam elevadas demandas hídricas.

2.1.2. Questões Climáticas e Edáficas

As porções da bacia médio e sub-médio estão inseridas na região Agreste do Estado de Pernambuco. Essa região é classificada intermediária entre as áreas de clima úmido (Zona da Mata) e de clima seco (Sertão), com características de ambas em diferentes períodos. Dessa maneira, nas áreas próximas ao Sertão, o clima é quente e seco, e o período mais chuvoso vai de fevereiro a junho; já no trecho sub-médio (Zona da Mata), a estação chuvosa compreende de março a julho (chuvas de outono/inverno) (CONDEPE/FIDEM, 2005).

Nesta região a vegetação predominante são Florestas Sub caducifólia e Caducifólia, próprias das áreas agrestes. É característico dessa bacia as classes de solos Planossolos, Neossolos, Regossolos, Argissolos e Solos Litólicos, além de significativas áreas de Afloramentos de Rocha. Sendo também encontradas diferentes classes de solos, como os Solos Aluviais (A) e os Latossolos (CONDEPE/FIDEM, 2005).

2.1.3. Estação Demonstrativa de Tratamento de Esgoto e Reúso Hidroagrícola

Mutuca fica localizado no município de Pesqueira-PE, distante 230 km da cidade de Recife, capital do Estado, precisamente na Mesorregião do Agreste Pernambucano. Apresenta uma população de aproximadamente 5.500 habitantes e, como a maioria dos povoados da zona rural do Estado, não dispõe de saneamento básico.

Além disso, os efluentes domésticos de 1/3 do povoado outrora drenavam diretamente para um açude, que recarrega o aquífero existente, principal fonte de água potável da região.

Com a alocação de um terreno de 4.078 m², próximo ao açude, pela Prefeitura Municipal de Pesqueira-PE, foi construída uma Unidade Demonstrativa de Tratamento de Esgoto pelo Laboratório de Água e Solo, entre a prefeitura e o Governo do Estado, cabendo à UFRPE conduzir atividades de reúso hidroagrícola do esgoto tratado, contribuindo assim para resolver dois problemas comuns às comunidades rurais do semiárido: a escassez de um recurso natural tão importante e a questão ambiental, já que a falta de saneamento básico ocasiona a degradação rios, riachos, açudes e mananciais. Transformar a água residuária em alimento e evitar a poluição dos recursos naturais faz da experiência de reaproveitamento da água em Mutuca-PE uma alternativa que pode servir de modelo para todo o semiárido nordestino.

A Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) de Mutuca atende a uma parte do distrito de Mutuca correspondente a 150 residências, com uma média de 5 moradores por unidade, totalizando cerca de 750 pessoas, cuja renda média é de um salário mínimo.

A estação de tratamento de esgotos é constituída de um tratamento preliminar com grades de barra, desarenador e calha Parshall; em seguida, um reator UASB, combinado com um filtro anaeróbio de fluxo descendente e lagoa de polimento (Figura 2).

Figura 2. Estação Demonstrativa de Tratamento de Esgoto e Reúso Hidroagrícola.

2.2. A cultura do Milho

2.2.1. Origem, Taxonomia e Aspectos morfofisiológicos

A forma conhecida atualmente do milho é oriunda de um processo de seleção feita a partir de variações genéticas naturais da planta. Segundo o Conselho de Informações sobre Biotecnologia (2006), a mais antiga espiga de milho foi encontrada no vale do Tehucan, no México, em torno de 7.000 a.C, o Teosinto, que é uma gramínea que produz várias espigas sem sabugo.

Botanicamente, o milho é um cereal pertencente à família das Poaceae, subfamília: Panicoidea, tribo: Maydeae, gênero: Zea e da espécie: *Zea mays* L., e o seu ancestral conhecido como Teosinto: *Zea mays* mexicana (Borém, 2005).

A planta de milho estruturalmente é constituída por uma haste cilíndrica com nós e entrenós compactos. Cada nó abaixo do solo produz raízes, e os nós, no nível do solo ou acima, podem produzir perfilhos e raízes adventícias. As folhas e as ramificações podem permanecer no estado embrionário ou desenvolverem-se para formar as inflorescências femininas (espigas), que são produzidas a partir do nível do solo. O colmo compacto termina na inflorescência masculina (pendão). As folhas são gradualmente expostas, à medida que o colmo se alonga, contudo, o crescimento ocorre em sua maior parte quando as folhas estão fechadas. Estas estão arranjadas alternadamente e suportadas pelas suas bainhas que envolvem o colmo (Fornasieri, 2007).

Barros e Calado (2014) destacam que a planta pode atingir uma altura de cerca de 2 metros, podendo variar o seu porte, apresentando folhas consideradas estreitas e com seu comprimento a ser muito superior a largura, distribuídas de formas alternadas no caule da planta. O milho é uma planta monóica, ou seja, possui os órgãos masculino e feminino na mesma planta em inflorescências diferentes, onde o pendão é o masculino, situado no topo do colmo que contém unicamente os estames com as anteras armazenando o pólen e os femininos em espigas.

A profundidade do sistema radicular do milho é variável em função do ambiente de crescimento, mas normalmente se desenvolve de 1,2 a 1,5 m de profundidade, e geralmente 60 a 80% do sistema radicular encontra-se nos primeiros 40 cm do solo (Rhoads e Bennett, 1990). Albuquerque e Resende (2002) ressaltam que, de uma maneira geral, a profundidade efetiva do sistema radicular do milho varia de 40 a 50 cm.

A semente do milho é classificada botanicamente como cariopse, apresentando três

partes: pericarpo, endosperma e o embrião. O pericarpo é uma camada fina e resistente, constituindo a parte mais externa da semente. O endosperma é a parte da semente que está envolvida pelo pericarpo e a que apresenta maior volume, sendo constituída por amido e outros carboidratos. O embrião encontra-se ao lado do endosperma, possuindo primórdios de todos os órgãos da planta desenvolvida, ou seja, é a própria planta em miniatura (Barros e Calado, 2014). Os grãos de milho são, geralmente, amarelos ou brancos, podendo apresentar coloração variando desde o preto até o vermelho. O peso individual do grão varia, em média, de 250 a 300 mg (EMBRAPA MILHO e SORGO, 2015).

O ciclo da cultura é variável conforme a finalidade de comercialização, assim como também do genótipo e das condições ambientais durante o seu cultivo.

Com relação às fases fenológicas do milho, Fornasieri (2007) divide o ciclo da cultura em fases vegetativa (V) e reprodutiva (R), subdividindo os estádios fenológicos da fase vegetativa e classificando-os numericamente como V1, V2, V3, etc., até Vn, em que n representa o estágio de última folha antes do pendoamento. O primeiro e último estágios são designados como VE (emergência) e VT (pendoamento). As seis subdivisões da fase reprodutiva são designadas numericamente de R1 (florescimento), R2 (grão bolha de água), R3 (grão leitoso), R4 (grão pastoso), R5 (grão farináceo) e R6 (maturidade fisiológica) (Tabela 1).

O conhecimento dessas fases é de suma importância para a tomada de decisão, considerando as práticas agrícolas a serem realizadas durante o manejo da cultura.

Tabela 1. Fases fenológicas do milho.

Estádio	Caracterização do estádio
	Fase Vegetativa
V0 ou VE	Germinação/Emergência: embebição, digestão de substâncias de reserva do cariopse, divisão celular e crescimento das raízes seminais.
V2	Emissão da 2ª folha: emissão das raízes primárias e das raízes seminais, início do processo fotossintético com duas folhas totalmente expandidas.
V4	Emissão da 4ª folha: definição do potencial produtivo.
V6	Emissão da 6ª folha: crescimento do diâmetro do colmo, aceleração do desenvolvimento do pendão e definição do número de fileiras de grãos na espiga.
V8	Emissão da 8ª folha: início da definição da altura da planta e da espessura do colmo.
V12	Emissão da 12ª folha: início da definição do número e tamanho de espiga.
V14	Emissão da 14ª folha.
	Fase Reprodutiva
Vt	Emissão do pendão e abertura das flores masculinas.
R1	Florescimento pleno: início da confirmação da produtividade.
R2	Grão leitoso.
R3	Grão pastoso.
R4	Grão farináceo.
R5	Grão farináceo duro.
R6	Maturidade fisiológica: máximo acúmulo de matéria seca e máximo vigor da semente, aparecimento do ponto preto na base do grão.

Fonte: Fancelli (2000) (adaptada)

O milho é uma espécie classificada fisiologicamente como uma planta C4, ou seja, tem melhor eficiência em relação às plantas de outras espécies cultivadas. Como planta C4, as folhas do milho não se saturam em condições de campo, mesmo diante elevadas intensidades de radiação, possibilitando à radiação solar, em geral, efeitos positivos na produtividade do milho (Searbrook e Boss, 1973). Essa saturação diminui a fotossíntese líquida, e essa queda pode ser atribuída ao processo denominado de fotorrespiração.

Para Magalhães e Paiva (1993), entende-se por fotorrespiração, presente nas plantas C3 e ausente nas plantas C4, como um processo oposto ao da fotossíntese, uma vez que ocorre utilização do oxigênio produzido, estimando-se menos carbono aos produtos finais.

2.2.2. Exigência Hídrica e Nutricional

A necessidade hídrica da cultura do milho é governada principalmente pelas condições climáticas do local. Para se obter produção máxima de grãos, a quantidade de água consumida durante o ciclo completo da cultura (evapotranspiração acumulada) varia entre 500 a 800 mm, dependendo do clima. O milho utiliza eficientemente a água em termos de produção total de matérias seca e, entre os cereais, é potencialmente a cultura de maior rendimento em grãos

(Magalhães et al., 1996).

Os coeficientes de cultivo (Kc) que relacionam as necessidade hídricas: Evapotranspiração da cultura - ETc com a Evapotranspiração de referência - ETo, para os diferentes estádios de crescimento da cultura do milho em grão, são os seguintes: no estádio inicial, 0,30-0,50 (15 a 30 dias); no estádio de desenvolvimento, 0,70-0,85 (30 a 45 dias); no estádio intermediário, 1,05-1,20 (30 a 45 dias); no estádio final, 0,80-0,90 (l0 a 30 dias) e, na colheita, 0,55-0,60 (Magalhães et al., 1996).

Para se ressaltar os efeitos do déficit hídrico no rendimento do milho, apresentam-se os seguintes resultados de pesquisas: dois dias de estresse hídrico no florescimento diminuem o rendimento em mais de 20%, quatro a oito dias diminuem em mais de 50%. O impacto da falta de água associado à produção de grãos é particularmente importante em três estádios de desenvolvimento da planta: a) iniciação floral e desenvolvimento da inflorescência, quando o número potencial de grãos é determinado; b) período de fertilização, quando o potencial de produção é fixado, e, nesta fase, a presença da água também é importante para evitar a desidratação do grão de pólen e garantir o desenvolvimento e penetração do tubo polínico; c) enchimento de grãos, ocorrendo aqui o aumento na deposição de matéria seca, que está intimamente relacionado com a fotossíntese, o estresse resulta na menor produção de carboidratos, o que implicaria menor volume de matéria seca nos grãos (Bergamaschi et al., 2004; Albuquerque, 2010).

Portanto, o milho é caracterizado como uma cultura que possui alta demanda hídrica e, também, por ser uma das mais eficientes no uso da água, apresentando alta relação de produção de matéria seca por unidade de água utilizada (Albuquerque e Andrade, 2001). Na maioria dos casos, o milho-verde é produzido por agricultores familiares, sendo a irrigação ainda pouco utilizada (Cardoso et al., 2011). Isso implica que à ausência de estudos relacionados à produção e análise de viabilidade econômica na utilização da irrigação no cultivo do milho-verde.

A exigência nutricional de uma planta é determinada pela quantidade de nutrientes que ela extrai durante o seu ciclo. No caso do milho, a extração total dependerá do rendimento obtido e da concentração de nutrientes nos grãos e na palha. Assim, tanto na produção de grãos como na produção de silagem, é necessário colocar à disposição da planta a quantidade total de nutrientes que essa extrai, em função da expectativa de produtividade, que devem ser fornecidos pelo solo e pela reposição nas adubações (Coelho e França, 1995; Von Pinho et al., 2009; Broch e Ranno, 2012). O N e o K são os nutrientes requeridos em maior quantidade pela cultura do

milho (Coelho e França, 1995; Ritchie et al., 2003; Von Pinho et al. 2009; Meneses, 2014).

Em relação à exportação dos nutrientes, o fósforo é quase todo translocado para os grãos (77 a 86%), seguindo-se o nitrogênio (70 a 77%), o enxofre (60%), o magnésio (47 a 69%), o potássio (26 a 43%) e o cálcio (3 a 7%). É justificado pela incorporação dos restos culturais do milho que devolve ao solo grande parte dos nutrientes, principalmente potássio e cálcio, contidos na palhada do milho (Coelho et al., 2011). Quando o milho é colhido para silagem, além dos grãos, a parte vegetativa também é removida, consequentemente, alta extração e exportação de nutrientes. Com isso, problemas de fertilidade do solo se manifestarão mais cedo na produção de silagem do que na produção de grãos (Coelho et al., 2011).

Carvalho et al. (2012) em pesquisa desenvolvida em ambiente protegido sobre eficiência na absorção e uso de N em diferentes cultivares de milho, verificaram que o peso de matéria seca da parte aérea das plantas foi diferente entre as cultivares testadas, apresentando tendência diferenciada entre as cultivares nos ambientes com baixa e alta demanda de N.

Portanto, é fundamental que se realize estudos da marcha de absorção dos nutrientes em função do tempo para estabelecer as necessidades de adubação nas épocas de realização e das quantidades mínimas que devem ser adubadas ao solo para mater a fertilidade durante os estádios das culturas (Von Pinho et al., 2009).

2.3. Reúso de água na agricultura

A aplicação de resíduos agropecuários apresenta potencial para suprir a demanda por nutrientes de forma sustentável (Castoldi et al., 2011). Neste sentido, a água residuária de esgoto doméstico tratado apresenta-se como uma fonte alternativa de nutrientes, contendo matéria orgânica, macro e micronutrientes (Cabral et al., 2011; Serpa Filho et al., 2013).

Lucena et al. (2018) afirmam que os esgotos tratados têm um papel fundamental no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos, como um substituto para o uso de águas destinadas a fins agrícolas, florestais, industriais, urbanos e ambientais.

Ribeiro et al. (2012), avaliando os efeitos da irrigação com água de esgoto doméstico sobre as variáveis de crescimento e produtividade da mamoneira, genótipo EBDA MPB 01, em condições de campo, verificaram que as diferentes diluições da água residuária de esgoto doméstico aplicada na cultura da mamoneira, influenciaram as variáveis de crescimento altura de planta e número de folhas, com exceção da variável diâmetro do caule. Os autores ainda constataram que a aplicação do efluente de esgoto doméstico tratado proporcionou boa

produtividade em comparação com a adubação química convencional, evidenciando potencial de uso da água residuária de esgoto doméstico tratado, com economia no consumo da água de qualidade superior.

Santos Junior et al. (2015) analisaram a viabilidade do aproveitamento da urina humana diluída em efluente doméstico (0; 1,5; 3,0 e 4,5%) na irrigação de plantas de milheto cultivadas em três solos (Luvissolo, Neossolo e Planossolo) oriundos de áreas degradadas do Núcleo de Desertificação dos Cariris, PB, e constataram que a adição de 4,5% de urina humana no efluente doméstico aplicado via irrigação em plantas de milheto cultivadas em Luvissolo crômico proporcionou resultados de massa de grãos e eficiência do uso da água semelhante ao observado em plantas com fertilização mineral recomendada, e irrigadas com água de abastecimento.

Medeiros et al. (2015), avaliando a viabilidade do aproveitamento da água residuária proveniente da suinocultura sobre a produção de massa seca, absorção, acúmulo e recuperação aparente dos macronutrientes na cultura do algodoeiro, concluíram que as plantas irrigadas com água residuária oriunda da suinocultura apresentaram melhor desempenho na produção de massa seca, absorção e acúmulo de nutrientes em relação ao tratamento testemunha.

Souza et al. (2016), em estudo avaliando o uso de água residuária de suinocultura como fonte alternativa de nutrientes no crescimento inicial do milho, em ambiente protegido, observaram que o aumento das doses de água residuária de suinocultura possibilitou incrementos lineares da altura, diâmetro do colmo e área foliar de plantas de milho. A aplicação de água residuária de suinocultura mostrou ser uma alternativa para adubação da cultura do milho, pois influenciou diretamente variáveis importantes da cultura.

Sendo assim, o uso planejado de águas residuárias implica necessidade menor de captação dos recursos hídricos, tornando-se, portanto, em estratégia eficaz para a conservação desse recurso natural, em seus aspectos qualitativos e quantitativos. Van Der Hoek et al. (2002) afirmam que as maiores vantagens do aproveitamento da água residuária para fins agrícolas contribuem para conservação da água disponível e aporte e reciclagem de nutrientes (reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos), concorrendo assim para sustentabilidade do meio ambiente.

2.3.2. Impactos da aplicação sucessiva de água residuária sobre o solo e plantas

Apesar do reúso planejado ser desenvolvido mundialmente, no Brasil, mesmo com escassez dos recursos hídricos em algumas regiões, esta prática ainda não tem sido utilizada de

forma generalizada; porém, é consenso geral que a irrigação com água residuária, de maneira inadequada, pode ser nociva ao meio ambiente, à saúde humana, ao solo, aos recursos hídricos e às culturas irrigadas, por conter certos constituintes poluentes (Duarte et al., 2008).

Os poluentes mais encontrados, são: a) a matéria orgânica, representada pela demanda bioquímica de oxigênio, pela demanda química de oxigênio e pelos sólidos suspensos totais; b) poluentes orgânicos, como os agrotóxicos; c) poluentes inorgânicos, como os metais pesados; d) excesso de macronutrientes, como o nitrogênio e o fósforo; e) microrganismos patogênicos, como as bactérias, os vírus e os parasitas, e f) os elementos que conferem a salinidade da água (Mancuso e Santos, 2003).

Com isso, a utilização da água residuária na agricultura pode ter um efeito adverso, apesar de que os impactos da aplicação de água residuária nas propriedades químicas do solo só são pronunciados ao longo do tempo, pelos parâmetros que definem sua composição físico-química, pelas condições de clima e pelo tipo de solo.

Pesquisas têm focado impactos do reúso no solo e na planta, com observações diversas pelos vários autores. As principais alterações nos atributos físicos do solo decorrentes da aplicação de água residuária de origem doméstica tratada via sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial em áreas cultivadas com grama foi o incremento na capacidade de retenção de água no solo, atribuído ao decréscimo de macroporos e ao acréscimo de microporos influenciando na condutividade hidráulica do solo saturado (Jnad et al. 2001). A diminuição no tamanho de poros foi atribuída à acumulação de sólidos em suspensão, matéria orgânica e decréscimo da concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo, em relação à de Na^{+}, que causou a dispersão das partículas de argila.

A tendência da utilização de águas com elevada salinidade e Razão de Adsorção de Sódio (RAS) é ocasionar um aumento na porcentagem de sódio trocável (PST) no solo e, com isso, aumentar o risco de deterioração das propriedades físicas do meio poroso, especificamente a dispersão de argila com subsequente desestruturação do solo a partir da quebra dos agregados, bloqueando os poros, e diminuindo a permeabilidade. Esse processo ocorrendo periodicamente, pode afetar a condutividade hidráulica do solo, prejudicando o crescimento das plantas, reduzindo a lixiviação, e acarretando a salinização do mesmo (Bond, 1998).

Bosco et al. (2008) verificaram as alterações químicas ocasionadas pela utilização de água residuária em um Latossolo Roxo Distroférrico na região oeste do Paraná decorrentes da aplicação durante oito anos consecutivos, de água residuária de suinocultura, a uma taxa de 99

mg ha^{-1} por ano. Os resultados mostraram que a aplicação aumentou a concentração de cálcio, magnésio e fósforo no solo. A concentração de fósforo, que antes da aplicação de água residuária era de 33,7 mg L^{-1} na camada de 0-30 cm e 3,8 mg L^{-1} na camada de 30-60 cm, aumentou para 51,1 mg L^{-1} (0-30 cm) e 5,4 mg L^{-1} (30-60 cm) após a aplicação.

Aguiar et al. (2006) analisaram, após a aplicação de resíduos bovinos e palha de arroz, perdas de nutrientes por lixiviação com destaque para o P, e que a presença de matéria orgânica na forma de esterco bovino favoreceu a lixiviação dos nutrientes. Caovilla et al. (2005), verificaram a percolação de nutrientes em colunas de solo cultivado com soja e irrigado com água residuária de suinocultura, verificaram que o nitrato apresentou maior mobilidade no processo de lixiviação seguido da concentração de sais totais e, posteriormente, do potássio, proporcionalmente aos tratamentos avaliados. De modo geral, o tratamento com 75% de água residuária também apresentou, nos lixiviados, os maiores níveis de concentração de nitrato, potássio e sais.

A salinidade é um dos principais fatores ambientais limitantes ao crescimento e produtividade das culturas (Lv et al., 2008), de modo que as altas concentrações de sais no solo, além de reduzir o seu potencial hídrico, podem provocar efeitos tóxicos nas plantas, causando distúrbios funcionais e injúrias no metabolismo (Silva et al., 2009).

A alta concentração de sais nos efluentes domésticos pode provocar acúmulo de sais no solo, favorecendo para o ajustamento osmótico nas plantas que tem por objetivo manter o fluxo de água no sentido solo-folha. A redução do componente osmótico é similar ao de um déficit hídrico consequente da depleção de água no solo para a maioria das plantas (Taiz e Zeiger, 2017).

Alguns pesquisadores avaliaram a resposta das culturas aos efluentes, dentre eles (Nobre et al. 2010; Duarte et al. 2008), sendo estes aumentos em torno de 15 a 41% em relação à da cultura irrigada com água de abastecimento, demonstrando a viabilidade do uso de esgoto na irrigação.

Portanto, para manter a sustentabilidade da produção, é necessário um monitoramento das características físico-químicas do solo, bem como dos produtos originários dessas áreas, evitando que a contaminação alcance nível prejudicial, principalmente do lençol freático.

2.4. Balanço de Sais no solo

Segundo Ribeiro et al. (2003), o crescimento populacional e a pressão econômica para produção de alimentos têm favorecido a expansão da área de solos degradados por salinidade e sodicidade, decorrente do uso inadequado do manejo da irrigação e do solo.

Um dos grandes desafios da atualidade é tornar as atividades de exploração dos recursos naturais sustentáveis. Um solo se degrada quando são modificadas as suas características físicas, químicas e biológicas (Pedrotti et al., 2015).

Com isso, o emprego da irrigação sem um adequado manejo e com as condições de drenagem deficitárias favorecem o crescente processo salinização, contribuindo para atingir níveis prejudiciais à maioria das culturas (Holanda et al., 2001). Há uma necessidade de adequar às culturas as condições de salinidade, com a utilização de culturas tolerantes, dentre outras técnicas como: melhorar a drenagem do solo, usar corretivos, monitorar sistematicamente os sais presentes no solo, e utilizar plantas extratoras.

Segundo Ayers e Westcot (1999), a cultura do milho é classificada como moderedamente sensível à salinidade do solo, com salinidade limiar da água de 1,1 dS m^{-1} e do extrato saturado do solo de 1,7 dS m^{-1}. Ayers e Westcot (1976) ressaltam redução no crescimento e rendimento do milho de até 50% na produção quando irrigado com água com valores acima de 3,9 dS m^{-1} de condutividade elétrica.

A utilização inadequada de água residuária contribui para aumento da condutividade elétrica do solo, podendo provocar a salinização e sodificação das áreas agrícolas. Ferreira et al. (2007) analisaram o balanço de sais na variedade de milho UFVM 100 e constataram sensibilidade à salinidade do solo e sua produção relativa decresceu 15,68% com incrementos unitários da salinidade do solo acima de 1,70 dS m^{-1}.

Para tanto é fundamental estudos regionais com novas cultivares, com intuito de analisar o comportamento dessas cultivares quanto à salinidade de água e do extrato saturado do solo, com objetivo de aprimorar as técnicas de manejo de água e solo para que sejam sustentáveis ao longo do tempo nos diferentes ambientes.

2.5. Modelagem matemática

2.5.1 Fluxo de água na zona radicular do solo

Em 1856 Henry Darcy quantificou o movimento de água no solo, por meio de experimentos em colunas de areia saturada com água. A equação ficou conhecida como Lei de Darcy, conforme Equação 1 (Gonçalves, 2013):

$$q = -K_S \frac{\Delta H}{\Delta z} \quad (1)$$

em que: q é a densidade de fluxo [L T^{-1}]; Ks é a condutividade hidráulica do solo saturada [L T^{-1}]; e $\Delta H/\Delta z$ é o gradiente de potencial total do fluxo na direção vertical z.

Para condição de meio não saturado, pode ser utilizada a Lei de Buckingham. Portanto, a equação de Darcy foi chamada de equação de Darcy-Buckingham conforme apresentado na Equação 2:

$$q = -K(\theta)\, \nabla H \quad (2)$$

em que: K(θ) ou K(h) é a condutividade hidráulica não saturada [L T^{-1}] que é função da umidade, θ [L^3 L^{-3}], ou em função do potencial mátrico, h [L].

Pelo princípio da conservação de massa de água contida em um determinado volume de controle do solo, verifica-se matematicamente a equação da continuidade, expressa na Equação 3 (Bezerra, 2010):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right] \quad (3)$$

em que: a densidade de fluxo (q) que entra no elemento de volume, por ser um vetor, pode ser decomposta nas três direções ortogonais x, y e z, onde θ representa a umidade volumétrica.

A combinação da equação de Richards (1931) com a equação de Darcy-Buckingham resultou na equação de Richards (Arraes, 2014), escrita para um fluxo vertical z, como visto na Equação 4:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}\left[K(\theta)\frac{\partial h}{\partial z}\right] \quad (4)$$

sendo: $\partial\theta/\partial t$ a variação da umidade com o tempo.

A curva de retenção de água no solo pode ser descrita por vários modelos matemáticos como: Brooks e Corey (1964), Haverkamp e Vauclin (1979) e van Genuchten (1980). O Método de van Genuchten é o mais utilizado, conforme a Equação 5:

$$\theta v = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{[1+(\alpha|\Psi m|)^n]^m} \quad (5)$$

sendo: θr a umidade residual do solo [L^3 L^{-3}], θs o teor de água do solo na saturação [L^3 L^{-3}], h é a carga de pressão ou potencial matricial [L], e α, n e m são parâmetros de ajuste do modelo.

van Genuchten (1980) descreveu a equação para a função da condutividade hidráulica do solo não saturado, em função da curva de retenção do solo (Equação 6):

$$K = K_S S_e^x \left[1 - \left(1 - S_e^{x/m}\right)^m\right]^2 \quad (6)$$

em que: x é o parâmetro de inclinação (Mualem, 1976), sendo adotado o valor de 0,5, para a maioria dos solos, Se é a saturação efetiva e Ks a condutividade hidráulica do solo saturado.

2.5.2 Modelos numéricos

Os custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais têm contribuído para expandir a utilização dos modelos númericos. Com isso, vale mencionar que as medições de campo são importantes, uma vez que os modelos númericos precisam de calibrações e validações locais para adequadamente simular cenários (Rivera et al., 2008).

Alguns modelos de simulações fazem uso da equação de Richards para o fluxo de água e a equação de convecção-dispersão para o transporte do soluto. Modelos que funcionam como ferramentas para predizer informações de dados de campo em diferentes tipos de solo, tipos de culturas e condições climáticas (Šimůnek et al., 2008).

Dessa maneira, os modelos podem ser utilizados para prever cenários físicos e ajudar na tomada de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos, uma vez que somente sua análise simulada tem valor limitado, tornando-se importante subsídio para uma série de informações geradas por um monitoramento contínuo para se validar o modelo, e nortear assim as técnicas de manejo.

2.5.3 O modelo HYDRUS-1D

O Hydrus-1D é um programa computacional que simula a dinâmica da água no solo, o transporte de calor e de solutos em ambientes com solos saturados e não saturados, sob condições com ou sem cultivo. O modelo é baseado na equação de Richards resultando a discretização das equações diferenciais com a utilização do método de elementos finitos, e inclui modelagem inversa para realizar a estimativa dos parâmetros hidráulicos e de transporte de solutos (Queiroz, 2017). Neste estudo, foco será dado ao balanço hídrico e aos parâmentros

hidráulicos dos perfis de solo.

O modelo numérico Hydrus 1D possui duas versões disponíveis gratuitamente. O Hydrus 1D (1998 a 2014) e o Hydrus-2D/3D. O Hydrus-1D foi desenvolvido por Šimůnek et al. (1998), sendo bastante utilizado em estudos acadêmicos. Ambos programas podem ser baixados diretamente no site da empresa (http://www.pc-progress.com) (Souza, 2015).

Vários pesquisas relatam a dinâmica da água no solo utilizando o HYDRUS-1D, como: Shao et al. (2018), que avaliaram o impacto do transporte não isotérmico da umidade do solo nos fluxos de evaporação em uma plantação de milho e verificaram que a formulação do transporte de vapor de solo advectivo em um contínuo de transferência solo-vegetação-atmosfera pode afetar os fluxos de evaporação simulados, especialmente em condições secas. Já Silva et al. (2015) em estudo no Brasil, em uma bacia localizada no semiárido de Pernambuco, realizaram a modelagem da umidade do solo através do HYDRUS-1D, e verificaram que o modelo apresentou um adequado desempenho em diferentes coberturas analisadas. Ursulino et al. (2019) avaliaram a dinâmica de umidade do solo em duas parcelas na Bacia Experimental da Gameleira, Nordeste do Brasil, e verificaram que a análise de desempenho das simulações forneceu fortes indícios da eficiência dos parâmetros estimados para prever a variabilidade da umidade do solo na bacia hidrográfica estudada, sem a necessidade de calibração ou abordagens numéricas complexas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA CONDEPE/FIDEM. **Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca**. (Série Bacias Hidrográficas de Pernambuco, 1). Recife, 2005. 64p.

ALBUQUERQUE, P.E.P.; ANDRADE, C. L. T. **Planilha eletrônica para programaçao da irrigação de culturas anuais**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2001. 14p. (Embrapa Milho e Sorgo. Circular Técnica, 10).

ALBUQUERQUE, P.E.P.; RESENDE, M. **Cultivo do milho**: **Manejo da irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2002. 15p. (Embrapa Milho e Sorgo. Comunicado Técnico, 47).

AGUIAR, M. I.; LOURENÇO, I. P.; OLIVEIRA, T. S.; LACERDA, N. B. Perda de nutrientes por lixiviação em um Argissolo Acinzentado cultivado com meloeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, p.811-819, 2006.

ARRAES, F. D. D. **Modelagem bidimensional do movimento da água em condições de solos não saturado. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola).** Universidade de São Paulo, USP, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 86p., 2014.

AYERS, R.S. WESTCOT, D.W. **A qualidade de água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, FAO, 1999, 153p. (Estudos Irrigação e Drenagem, 29 revisado).

AZEVEDO, L.P.; OLIVEIRA, E.L. Efeitos da aplicação de efluente de tratamento de esgoto na fertilidade do solo e produtividade de pepino sob irrigação subsuperficial. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.1, p.253-263, 2005.

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. **A Cultura Do Milho**. Évora: Portugal, 2014. Disponível em: <http://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/10804>. Acesso em 28 de maio de 2018.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.; BERGONCI, J. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, n.9, p. 831-839, 2004.

BEZERRA, H. M. A. **Influência da concentração do cloreto de sódio no coeficiente de descarga em orifícios, Dissertação (Mestrado),** Universidade Federal Rural do Semi – Árido, 147p. 2010.

BORÉM, A. **Melhoramento de espécies cultivadas**. Viçosa: MG. 2005. 2º Edição; Editora UFV.

BROCH, D. L.; RANNO, S. K. **Fertilidade do solo, adubação e nutrição da cultura do milho**. In: Tecnologia e Produção: Soja e Milho 2011/2012. Fundação MS, Maracaju-MS, 2012, p.240-252.

BOSCO; T. C.; IOST; C.; SILVA; L. N.; CARNELLOSI, C. F.; EBERT, D. C.; SCHREINER; J. S.; SAMPAIO, S. C. Utilização de água residuária de suinocultura em propriedade agrícola - Estudo de caso. **Irriga**, v.13, p.139-144, 2008.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. Australian **Journal of Soil Research**, v.36, p.543-555, 1998.

BROOKS, R. H.; COREY, A. T. Hydraulic properties of porous media. **Hydrology Paper**, n.3, Fort Collins: Colorado State University, 27p., 1964.

CABRAL, J.R.; FREITAS, P.S.L.; REZENDE, R.; MUNIZ, A.S.; BERTONHA, A. Impacto da água residuária de suinocultura no solo e na produção de capim elefante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.823–831, 2011.

CARDOSO. M, J.; RIBEIRO, V. Q.; MELO, F. B. **Performance de Cultivares de Milho-Verde no Município de Teresina**, Piauí, 2011. Comunicado Técnico 227.

CARVALHO, R. P. de.; VON PINHO, G.; R.; DAVIDE, L. M. C. Eficiência de cultivares de milho na absorção e uso de nitrogênio em ambiente de casa de vegetação. **Ciências Agrárias**, v.33, n. 6, p.2125-2136, 2012.

CASTOLDI, G.; COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M.; PIVETTA, L. A.; STEINER, F. Sistemas de cultivo e uso de diferentes adubos na produção de silagem e grãos de milho. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 139-146, 2011.

CHEN, M.; WILLGOOSE, G. R.; SACO, P. M. Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D. **Hydrological Processes**, v.28, p.171-185, 2014.

COELHO, A. M.; RESENDE, A. V.; SANTOS, F. C. Exigências nutricionais e adubação: milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde. In. CRUZ, J. C.; MAGALHAES, P. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; MOREIRA, J. A. A**. Milho: o produtor pergunta, a Embrapa responde**. Brasília, DF: Informação Tecnológica, Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. cap.6. p.73-82.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Perspectivas para a agropecuária**. v.5, safra 2017/2018, Produtos de Verão. Brasília: 2017. Disponível em:https://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_09_06_09_30_08_perspectivas_da_ agropecuaria_bx.pdf. Acesso em: 25 de maio de 2018.

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA. **Guia do Milho, Tecnologia do Campo a Mesa**. São Paulo: 2006. Disponível em: <http://www.cib.org.br/pdf/guia_do_milho_CIB.pdf >. Acessado em 26 de maio de 2018.

COUTINHO, A. P. **Pavimento permeável como técnica compensatória na drenagem urbana da cidade do Recife. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil).** Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFPE, Recife, 134p., 2011.

CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A.; PIMENTEL, M. A. G.; COELHO, A. M.; KARAM, D.; CRUZ, I.; GARCIA, J. C.; MOREIRA, J. A. A.; OLIVEIRA, M. F. de; GONTIJO NETO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. E. P. de; VIANA, P. A.; MENDES, S. M.; COSTA, R. V. da; ALVARENGA, R. C.; MATRANGOLO, W. J. R. **Produção de milho na agricultura familiar**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2011. 45p.

DEUS, R. A. S. G.; COSTA, S. O. S; LOURENÇO, E. R. C.; GOLDFARB, M. C.; DUARTE, C. C.; GOMES, D. D. M. Análise das características morfométricas da bacia hidrográfica do rio Ipojuca – PE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.2, n. Especial, 2016.

DE JONG VAN LIER, Q.; DOURADO NETO, D.; METSELAAR, K. Modeling of transpiration reduction in van Genuchten-Mualen type soils. **Water Recourses Research**, v.45, n.2, p.1-9, 2009.

DUARTE, A. S; AIROLDI, R. P. S.; FOLEGATTI, M. V.; BOTREL, T. A.; SOARES, T M. Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.302–310, 2008.

EMBRAPA - **Milho e Sorgo**. 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/milhoesorgo/cultivos>. Acesso em: 26 de maio 2018.

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. Ecofisiologia e fenologia. In: FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: Agropecuária, 2000. p.21-54.

FORNASIERI, F. D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576p.

HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M. A note on estimating finite difference interblock hydraulic conductivity values for transiente unsaturated flow problems. **Water Resources Research**, v.5, n.1, p.181-187, 1979.

HOFFMAN, G. J. Alleviating salinity stress. In: G. F. Arkin and H. M. Taylor, (Eds.). Modifying the Root Environment to Reduce Crop Stress. **American Society of Agricultural Engineers**, p. 305-341, 1981.

JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A.; SABBAGH, G. Subsurface drip of residential effluent: I. soil chemical characteristics. **American Society of Agricultural Engineers**, v.44, n.5, p.1149 -1157, 2001.

LUCENA, C. Y. S.; SANTOS, D. J. R.; SILVA, P. L. S.; COSTA, E. D.; LUCENA, R. L. O REÚSO de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v.4, nº Especial, 2018.

LV, S.; ZHANG, K.; QIANG, G.; LIAN, L.; YINGJIE, C.; ZHANG, J. Overexpression of an H+-PPase gene from Thellungiella halophila in cotton enhances salt tolerance and improves growth and photosynthetic performance. **Plant & Cell Physiology**, v. 49, n.8, p.1150-1164, 2008.

MAGALHÃES, P. C.; PAIVA, E. Fisiologia da produção de milho. **In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA**. Recomendações técnicas para o cultivo do milho. Brasília: EMBRAPA, SPI, p.65-92, 1993.

MAGALHÃES, P. C., DURÃES, F. O., GOMIDE, R. L. Fisiologia da cultura do milho. Empresa Capixaba de Pesquisa Agropecuária. **Manual técnico para a cultura do milho no estado do Espírito Santo**. Vitória: EMCAPA, p.15-33,1996.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de água**. 1.ed. São Paulo: Manole, 2003. 576p.

MEDEIROS, S. de S.; PEREZ-MARIN, A. M.; SANTOS JÚNIOR, J. A.; REIS, C. F.; GHEYI, H. R. Potencial hídrico-nutricional da água residuária de suinocultura na irrigação do algodoeiro cultivado em condições semiáridas. **Irriga**, v.20, n. 2, p. 248-260, 2015.

MENESES, N. B. **Marcha de acúmulo de matéria-seca e de nutrientes pelo milho superdoce, 55p. Tese (Mestrado),** Universidade Estadual Paulista. Jaboticabal, 2014.

MONTEIRO, A. L. N. **Avaliação de lavagem incompleta de sais em Neossolo Flúvico utilizando modelagem computacional. Tese (Doutorado em AgronomiaCiência do Solo)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, Recife, 103p., 2007.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.12, p.513-522, 1976.

NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; SOARES F. A. L.; ANDRADE L. O. de; NASCIMENTO E. C. S. Produção do girassol sob diferentes lâminas com efluentes domésticos e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.7, p.747–754 2010.

RIBEIRO, M. C. de F.; ROCHA, F. A.; SANTOS, A. C. dos.; Silva J. O. da.; PEIXOTO, M. de F. S. P.; PAZ, V. P. da S. Crescimento e produtividade da mamoneira irrigada com diferentes diluições de esgoto doméstico tratado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiente**, v.16, n.6, p.639-646, 2012.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: USDA, 1954. 60 p. Handbook, 60.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **Como a planta de milho se desenvolve**. Potafos: informações agronômicas, n.103, arquivo do agrônomo, n.15, setembro de 2003.

RIVERA, R.N.C.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; BOTREL, T.A. Modelo aplicado à dinâmica da água e do potássio no solo sob irrigação por gotejamento - análise de sensibilidade. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.28, n.3, p.448-459, 2008.

RHOADS, F.M.; BENNETT. Corn. In: STEWART, B.A. & NIELSEN, D.R., co-ed, Irrigation of Agricultural Crops. **American Society of Agronomy**, p.569-596, 1990.

SANTOS, R. S. S. **Simulação da dinâmica do íon potássio pelo modelo HYDRUS-1D em condições de solo salino. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas).** Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ-USP, Piracicaba, 2014.

SANTOS JÚNIOR, J. A.; SOUZA, C. F.; PÉREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. R.; MEDEIROS, S. S. Interação urina e efluente doméstico na produção do milheto cultivado em

solos do semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.456–463, 2015.

SEARSBROOK, C. E.; BOSS, B. D. Leaf area index and radiation as related to corn yield. **Agronomy Journal**, v.57, p.459-471, 1973.

SERPA FILHO, R.; SEHNEM, S.; CERICATO, A.; SANTOS JUNIOR, S.; FISCHER, A. Compostagem de dejetos de suínos. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 6, n.1, p.47-78, 2013.

SILVA, J. R. L DA. **Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de Pernambuco. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)**. Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFPE, Recife, 129p., 2015.

SILVA, J. R. L. DA; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JUNIOR, V. P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.10, p.293-303, 2015.

SILVA, E. N.; SILVEIRA, J. A. V.; FERNANDES, C. R. R.; DUTRA, A. T. B.; ARAGÃO, R. M. Acúmulo de íons e crescimento de pinhão- manso sob diferentes níveis de salinidade. **Revista Ciência Agronômica**, v. 40, n. 2, p.240-246, 2009.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, M.H.; SAKAI, M.; Van GENUCHTEN, M. Th. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. **Department of Environmental Sciences**, **University of California Riverside**, p.332, 2009.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; VAN GENUCHTEN, M. The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, user's manual, versão 4.0, **Department of Environmental Sciences, University of California Riverside**, U.S. Salinity Lab., Agric. Res, California, 2008.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.; GRIBB, M. M.; HOPMANS, J. W. Parameter estimation of unsatured soil hydrulic properties from transient flow processes. **Soil and Tillage Research**, v.47, n.1, p.27-36, 1998.

SOUZA, E. da S.; BRITO, C. F. B.; FONSECA, V. A.; BEBÉ, F. V. Crescimento de milho em Latossolo com aplicação de água residuária de suinocultura. **Enciclopédia Biosfera**, v.13 n.23, p. 369-375, 2016.

SOUZA, P. G. C. **Obtenção da curva de retenção de água em Latossolo empregando dados de mini-infiltrômetro e técnicas de modelagem. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias).** Universidade Federal de São João Del-Rei, UFSJ, Sete Lagoas, 105p., 2015.

SHAO, W.; COENDERS-GERRITS, M.; JUDGE, J.; ZENG, Y.; SU, Y. The impact of non-isothermal soil moisture transport on evaporation fluxes in a maize cropland. **Journal of Hydrology**, v.561, p.833-847, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: ARTMED, 2017. 888p.

Ursulino. B. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Coutinho, A. P.; Coelho, V. H. R.; Araújo, D. C. dos S.; Gusmão, A. C. V.; Santos Neto, S. M. dos, Lassabatere, L.; Angulo-Jaramillo, R. Modelling Soil Water Dynamics from Soil Hydraulic Parameters Estimated by an Alternative Method in a Tropical Experimental Basin. **Water**, v.11, p. 1007, 2019.

VAN DER HOEK, W.; HASSAN, U.M.; ENSINK, J.H.J.; FEENSTRA, S.; RASCHID-SALLY, L.; MUNIR, S.; ASLAM, R.; ALIM, N.; HUSSAIN, R.; MATSUNO, Y. **Urban wastewater: a valuable resource for agriculture.** A case study from Horoonabad, Pakistan. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 29 p. (Research Report, 63). 2002.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. A. R.; REIS, M. C. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

CAPÍTULO II

Crescimento e consumo hídrico do milho irrigado sob diferentes concentrações de água residuária

CRESCIMENTO E CONSUMO HÍDRICO DO MILHO IRRIGADO SOB DIFERENTES CONCENTRAÇÕES DE ÁGUA RESIDUÁRIA

RESUMO

A crise hídrica é um problema de amplo escopo global, sobretudo no semiárido brasileiro. Como alternativa, o reúso agrícola busca a utilização de efluentes tratados afim de otimizar a produção agrícola. Neste contexto, objetivou-se avaliar a influência da aplicação de diferentes concentrações de água residuária no crescimento e consumo hídrico do milho irrigado em solo representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE. O experimento foi conduzido em ambiente protegido na área experimental do Campus da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE-Recife, durante os meses de Dezembro de 2017 a Janeiro de 2018. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com 05 tratamentos e 05 repetições, totalizando 25 unidades experimentais. Os tratamentos foram compostos com as diferentes concentrações de água residuária diluído com água de abastecimento nas porcentagens: T1 – 100% de água residuária (AR), T2 - 75% AR + 25% de água de abastecimento (AB); T3 - 50% AR + 50% AB; T4 - 25% AR + 75% AB; T5 – 100% AB + adubação convencional. As variáveis analisadas foram: altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF), área foliar (AF), taxa de crescimento absoluto em altura de planta (TCA_{AP}), taxa de crescimento relativo em altura de planta (TCR_{AP}), taxa de crescimento absoluto em área foliar (TCA_{AF}) e taxa de crescimento relativo em área foliar (TCR_{AF}); massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR) e consumo hídrico da cultura do milho. A utilização de água residuária constitui uma fonte potencialmente importante no desenvolvimento do milho quando irrigado com maiores concentrações associado com água de abastecimento. O incremento na concentração de água residuária promoveu redução na evapotranspiração da cultura e consumo hídrico. Os coeficientes de cultivos (Kc's) encontrados em todas as concentrações de água residuária para o milho foram superiores aos da FAO-56.

Palavras-chave: *Zea mays* L., reúso de água, demanda hídrica.

GROWTH AND WATER CONSUMPTION OF IRRIGATED CORN UNDER DIFFERENT RESIDUARY WATER CONCENTRATIONS

ABSTRACT

The water crisis is a problem of broad global scope, especially in semi-arid regions such as the Brazilian Northeast. As an alternative, agricultural reuse seeks the use of treated effluents in order to optimize agricultural production. In this context, the objective was to evaluate the influence of the application of different concentrations of residual water in the development and water consumption of irrigated maize in soil representative of the Ipojuca River Basin-PE. The experiment was conducted in a protected environment in the Campus of the Federal Rural University of Pernambuco-UFRPE-Recife. The experimental design was in randomized blocks, with 5 treatments and 5 replications, totaling 25 experimental units. The treatments were composed of the different concentrations of diluted wastewater with water supply in the percentages: T1 - 100% of wastewater (AR), T2 - 75% AR + 25% of fresh water (AB); T3 - 50% AR + 50% AB; T4 - 25% AR + 75% AB; T5 - 100% AB + chemical fertilization. The variables analyzed were: plant height (AP), stem diameter (DC), number of leaves (NF), leaf area (AF), absolute growth rate in plant height (TCAAP), relative growth rate in height (TCRAP), absolute leaf area growth rate (TCAAF), and relative leaf area growth rate (TCRAF); fresh mass of the aerial part (MFPA), aerial part dry mass (MSPA), fresh root mass (MFR), root dry mass (MSR) and corn crop water consumption. The use of wastewater is a potentially important source of corn development when irrigated with high concentrations of wastewater associated to water supply. The increase in the concentration of residual water promoted a reduction in crop evapotranspiration and water consumption. The crop coefficients (Kc's) found at all concentrations of wastewater for maize were higher than those of FAO-56.

Key-words: *Zea mays* L., water reuse, water demand.

1.0 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura de grande importância agrícola, apresentando boa adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras, além de ser uma ótima fonte proteica (Carvalho et al., 2006).

O Brasil é o terceiro produtor mundial de milho, inferior apenas para Estados Unidos e China, atingindo sua maior produção estimada em 94 milhões de toneladas na safra (2018/2019), sendo uma área plantada de 17,25 milhões de ha. Pernambuco se destaca na região Nordeste como sexto produtor de milho, sendo cultivado em quase todas as microrregiões do Estado por pequenos e médios produtores, tanto para produção de grão quanto para silagem, registrando uma produção de 130 mil toneladas e área plantada na safra (2018/2019) aproximada de 217,9 mil ha (CONAB, 2018).

A região semiárida do Brasil é caracterizada por apresentar insuficiência hídrica e chuvas mal distribuídas. Uma das alternativas para aumento da produtividade das culturas nessa região é a irrigação, porém, sendo necessária a utilização de tecnologias que visem o uso racional de água e o manejo adequado dos recursos hídricos (Jacobi e Grandisoli, 2017).

O reúso agrícola representa uma alternativa acessível e sustentável para manter o rendimento das culturas. O manejo criterioso da água residuária na irrigação permite fornecer nutrientes e suprir total ou parcialmente as necessidades nutricionais das plantas, o que reduz os problemas ambientais, devido ao menor lançamento de poluentes em cursos hídricos, e a demanda por outras fontes de água de melhor qualidade. Entretanto, apesar dessas vantagens, pode ocorrer a contaminação do solo e de águas subterrâneas, devido à lixiviação no período chuvoso em regiões semiáridas, quando utilizado o critério de irrigação (Zhang et al., 2012).

Diversos trabalhos são relatados na literatura abordando o crescimento e à produtividade das culturas fertirrigadas com água residuária, principalmente na forma tratada (Feitosa et al., 2015; Malafaia et al., 2016; Santos et al., 2017; Dantas et al., 2019).

No entanto, para expressão do potencial produtivo e obtenção de melhores rendimentos, a determinação das necessidades hídricas e otimização do uso da água na agricultura é fundamental, exigindo a adoção de tecnologias que promovam aumento da eficiência de irrigação (Santos et al., 2018).

Neste sentido, diferentes metodologias têm sido adotadas para obtenção do requerimento hídrico das culturas por meio da evapotranspiração da cultura. Estas incluem métodos micrometeorológicos e do balanço de água no solo, por meio do uso de sondas ou lisímetros, e podem resultar em indicadores a serem utilizados no manejo racional da irrigação (Silva et al., 2012). Dentre os indicadores utilizados, está o coeficiente de cultura (Kc), que compreende a relação entre a evapotranspiração da cultura e a evapotranspiração de referência, e que é dependente da espécie, altura, área foliar e manejo da cultura (Allen et al., 1998).

Vários trabalhos relatam a aplicação dos coeficientes de cultura (Kc's) na cultura do milho, a exemplo de Souza et al., (2015) que avaliaram o Kc em sistemas de plantio exclusivo e consorciado sob as condições climáticas do Semiárido brasileiro, onde constataram que as variações dos valores de Kc para ambos os sistemas estiveram associadas ao incremento de biomassa e a interceptação da radiação. Xu et al. (2018) analisaram o Kc em duas variedades de milho com diferentes tamanhos de dossel em região semiárida de Pequim e verificaram que as características do consumo de água para o milho de diferentes tamanhos de dossel podem ajudar a otimizar a utilização da água na região semiárida. Adicionalmente, Jiang et al. (2019) avaliaram por meio do modelo multisource a evapotranspiração da cultura e seus componentes em região árida do noroeste da China e constataram que o modelo multisource baseado na interceptação de radiação por espécies vizinhas é adequado para estimar ET e seus componentes de milho cultivados para a produção de sementes na região árida do Noroeste da China.

Estudos com diluições de água residuária ainda são bastante escassos no Brasil, fazendo-se necessário compreender o comportamento das culturas sobre influência de diversas concentrações em busca de se obter uma proporção de maior produtividade, e que possibilite um manejo adequado para irrigação. Neste contexto, objetivou-se avaliar a influência da aplicação de diferentes concentrações de água residuária no crescimento e consumo hídrico do milho irrigado em solo representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

2.0 MATERIAL E MÉTODOS

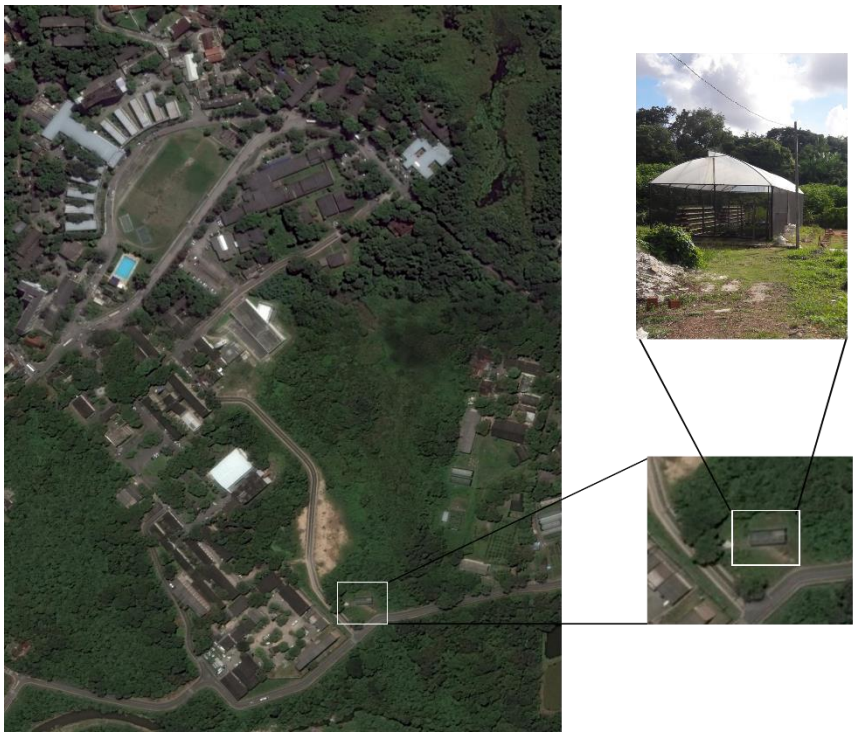
2.1 Localização do ambiente experimental

O experimento foi desenvolvido em condições de ambiente protegido na Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE/DEAGRI, Campus Recife, sob as seguintes coordenadas geográficas: 08º 01' 07'' S e 34º 56' 53'' W, e altitude de 6,5 m de acordo com o sistema SAD

69 (South American Datum) (Figura 1), durante os meses de Dezembro de 2017 a Janeiro de 2018, com a cultura do milho, até os 60 dias após a semeadura (DAS).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média é de 2.263,5 mm ano^{-1} concentrada, principalmente, entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 377,9 mm no mês de mais chuvoso (junho); as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média 79,8%, insolação 2550,7 horas. O total de evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 e 1.600 mm ano^{-1} (Barros, 2019; INMET, 2019).

Figura 1. Localização da Casa de Vegetação-UFRPE.

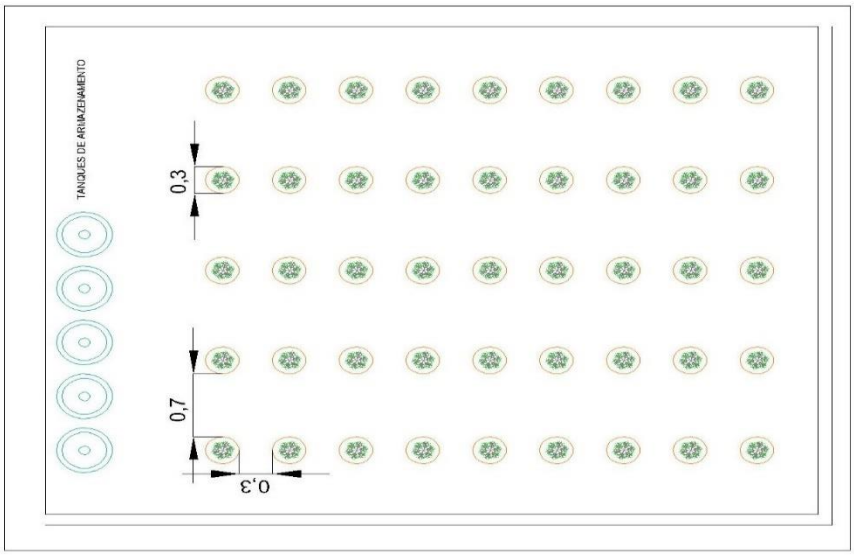


Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 Caracterização experimental

A área experimental foi composta por 25 vasos plásticos com capacidade de 15 L, diâmetro externo na borda superior de 0,30 m e altura externa de 0,30 m, totalizando uma área superfície de 0,07 m^2, dispostos conforme croqui experimental (Figura 2).

Figura 2. Croqui da área experimental em condições de ambiente protegido.



Fonte: Elaborada pela autora.

Para preenchimento interno dos vasos foi colocada uma camada de 3 cm de brita nº1 em cada vaso, a fim de encobrir o dreno e facilitar a drenagem. Após o preenchimento com camada de brita foi colocado sobre a mesma manta geotêxtil (Bidim), com finalidade de filtro, para evitar a passagem de partículas de solo para a camada inferior. Após a colocação da manta geotêxtil, os sistemas foram preenchidos com 14 kg de solo seco, mantendo a densidade do solo. Por fim, foram alocados em tijolos, afim de nivelar a área experimental.

O solo utilizado foi um Planossolo Háplico Sálico Sódico Hipereutrófico, representativo da Bacia do rio Ipojuca-PE. Antes da implantação do experimento, amostras compostas foram retiradas para determinação dos atributos físicos e químicos, na camada de 0-30 cm e encaminhada ao Laboratório de Química Ambiental de Solos do Departamento de Agronomia – Área de Ciência do Solo/UFRPE (Tabela 1), conforme metodologias propostas pela EMBRAPA (2017).

Tabela 1. Características físico-químicas do solo utilizado para o plantio milho antes da aplicação dos tratamentos, Mutuca-PE.

	Areia	Argila	Silte	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
Amostra de solo	_____%_____			_ g cm^{-3}_		___%___	_____%_____		
	78,9	16,05	5,05	1,43	2,69	46,84	9,6	4,58	Areia Franca

pH (água)	Ca	Mg	Al	Na	K	P	C.O	M.O	H+Al	PST
1:2,5	$cmol_c dm^{-3}$					$mg\ dm^{-3}$	$g\ kg^{-1}$		$cmol_c\ dm^{-3}$	%
7,4	5,1	1,14	0	0,24	0,57	382	7,63	13,16	3,11	2,36

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de Campo e PMP: Ponto de Murcha Permanente; C.O – Carbono orgânico; M.O – Matéria orgânica;

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com 05 tratamentos e 05 repetições, totalizando 25 unidades experimentais. Os tratamentos foram compostos com as diferentes concentrações de água residuária (AR) diluído com água de abastecimento (AB) nas porcentagens: T1 – 100% AR, T2 - 75% AR + 25% AB, T3 - 50% AR + 50% AB; T4 - 25% AR + 75% AB; T5 – 100% AB + adubação convencional.

2.4 Dimensionamento das águas utilizadas e manejo de irrigação

A água residuária utilizada foi oriunda da Estação de Tratamento e Reúso Hidroagrícola localizada no Distrito de Mutuca-Pesqueira-PE, de origem de esgoto doméstico tratado. O efluente foi encaminhado para o local de condução do experimento e armazenado em uma caixa de água de 3000 L e diluído com o auxílio de outros 3 reservatórios de água de 100 L, de forma a implementar os tratamentos T2, T3 e T4, e o tratamento T1 100% de água residuária. Para os tratamentos T5 utilizou-se um reservatório de 100 L com água de abastecimento local proveniente de poço do CEGOE/UFRPE.

Tabela 2. Caracterização físico-química da água de abastecimento e das concentrações de água residuária utilizada no experimento.

Constituintes	Unidade	100%AR	75%AR	50%AR	25%AR	100%AB
pH	-	7,9	7,7	7,4	6,9	6,3
CE	$dS\ m^{-1}$	3,13	2,5	1,4	0,725	0,13
K^+	$mg\ L^{-1}$	2,5	0,013	0,010	0	0,15
P-Total	$mg\ L^{-1}$	2,5	2,5	2	1	-
Na^+	$mg\ L^{-1}$	1172,23	644,94	569,62	449,1	5,4
Alcalinidade	$mg\ L^{-1}$	708	474	280	125	11,7
Cloretos	$mg\ L^{-1}$	700	200	550	400	15,4
DBO	$mg\ L^{-1}$	30	20	16	15	-
DQO	$mg\ L^{-1}$	125	114	57	35	-
SS*	$mg\ L^{-1}$	0,5	0,4	0,1	0	-
ST	$mg\ L^{-1}$	2345	1695	1155	581	-
SF	$mg\ L^{-1}$	2094	1474	1026	506	-
SV	$mg\ L^{-1}$	251	221	129	75	-

SS	mg L^{-1}	50	19	10	2	-

CE – Condutividade elétrica; DQO - Demanda Química de Oxigênio; DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio, SS* - Sólidos Sedimentáveis; ST - Sólidos Totais; SF - Sólidos Fixos; SV - Sólidos Voláteis; SS - Sólidos Solúveis.

O critério adotado na definição das lâminas de irrigação com água residuária (aplicadas manualmente) na implantação dos tratamentos foi baseado na pesagem direta dos vasos, conforme Equação 1. A frequência da aplicação da água residuária foi com turno de rega de dois dias. Os vasos foram irrigados com 1,8 L de água, volume que corresponde a uma umidade de 90% da Capacidade de Campo em base de massa.

$$Li = U_{CC} - U_I \quad (1)$$

em que: L – lâmina aplicada, em L; U_{cc} - umidade do solo com base em peso na capacidade de campo (90%), em gramas; U_i - umidade do solo com base em peso seco no momento de irrigação, em gramas. Para ajustar a lâmina em L, transformou-se os valores em gramas para litros, dividindo-se por 1000.

2.5 Descrição e implementação da cultura

A semeadura do milho foi realizada manualmente a 5 cm de profundidade, usando-se 5 sementes $vaso^{-1}$. Logo após a germinação foi realizado o desbaste, restando apenas 1 planta $vaso^{-1}$. Utilizou-se a cultivar São José (BR 5026 do IPA), sendo semeada no espaçamento de 0,7 m entre linhas e 0,30 m entre plantas.

Para suprir as necessidades nutricionais da cultura foi realizada adubação segundo o Manual de Recomendação de Adubação do Instituto Agronômico de Pernambuco (Cavalcanti et al., 2008). A adubação mineral convencional consistiu em 90 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 (Superfosfato triplo) e 20 kg ha^{-1} de K_2O (Cloreto de potássio). O nitrogênio foi parcelado, com a aplicação de 30 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia, por ocasião da emergência, e o restante (60 kg ha^{-1}) com 40 dias após a semeadura (DAS).

2.6 Análise de crescimento e índices fisiológicos

As variáveis de crescimento analisadas foram: altura da planta (AP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e área foliar (AF). A altura da planta foi definida mensurando-se a distância entre o colo da planta até a inserção da primeira folha bandeira, o diâmetro caulinar foi medido a 5 cm da superfície do solo, utilizando-se de paquímetro digital. A contagem do número de folhas considerou-se apenas as que estivessem expandidas, desprezando-se as folhas secas rente ao solo e aquelas cujo limbo foliar estava danificado em mais de 50%.

A área foliar foi estimada de acordo com o método proposto por Francis et al. (1969), que relaciona a maior largura foliar (B) e o comprimento médio de folhas (L) da planta de milho. Essa estimativa foi realizada pela Equação 2:

$$AF = (0{,}75 * B * L) \quad (2)$$

em que: AF - área foliar da planta (cm^2), B - largura máxima da folha +3 e L - comprimento principal e 0,75 uma constante de correção.

Foram determinados, a partir dos dados primários de crescimento e equações propostas por Benincasa (2003) e Silva (2006), os seguintes índices fisiológicos: taxa de crescimento absoluto em altura de planta (TCA_{AP}), taxa de crescimento relativo em altura de planta (TCR_{AP}), taxa de crescimento absoluto em área foliar (TCA_{AF}) e taxa de crescimento relativo em área foliar (TCR_{AF}), avaliados aos 15, 30, 45, e 60 dias após a semeadura (DAS).

2.7 Componentes de produção

Na ocasião da colheita aos 60 DAS, as variáveis de componentes de produção analisadas foram: massa fresca da parte aérea (MFPA), massa seca da parte aérea (MSPA), massa fresca da raiz (MFR), massa seca da raiz (MSR). O material vegetal foi colhido e encaminhado para laboratório de Água e Solo da UFRPE, no qual foi realizada a secagem em estufa com ventilação forçada de ar, a 65 °C, até a obtenção de peso constante, conforme Benincasa (2003).

2.8 Evapotranspiração e Consumo Hídrico

A evapotranspiração de referência no interior da casa de vegetação foi determinada a partir de evaporímetro de Piche (ETpi), calculadas por diferença do nível de água no tubo graduado em milímetros entre dias subsequentes, segundo Villa-Nova e Ometto (1981), conforme Equação 3:

$$ETpi = \frac{(0{,}28 \times Pi)}{(1-w)} \quad (3)$$

em que: ETPi - leitura obtida pelo evaporímetro de Piché, (mm dia^{-1}); w - definido por Makkink (1957) como sendo uma função da temperatura do ar (Equação 4):

$$w = 0{,}407 + 0{,}0145 \times T \quad (4)$$

A ETc foi obtida através de medidas diretas no sistema lisimétrico de acordo com (Aboukhaled et al., 1982) que estabelece a seguinte Equação 5:

$$ETc = (P + I - D)/A \quad (5)$$

em que: ETc - evapotranspiração da cultura (mm); P - precipitação pluviométrica (mm); I: lâmina de água aplicada por irrigação (mm); D - água drenada do lisímetro (mm); A - área do

lisímetro (m^2). Como o cultivo foi realizado em ambiente protegido, vale mencionar que a precipitação foi zero.

A razão entre ETc e a ETo é denominado coeficiente da cultura (Kc), que foi determinado segundo a Equação 6:

$$Kc = \frac{ETc}{(ETo)} \quad (6)$$

em que: Kc - coeficiente da cultura (adimensional); ETc - evapotranspiração da cultura (mm dia^{-1}); ETo - evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}).

O ciclo da cultura do milho segundo Doorenbos e Pruitt (1977), compreende as seguintes fases fenológicas:

I) Estádio I – (D. vegetativo) (0 a 40 dias);
II) Estádio II – (Floração) (40 a 53 dias);
III) Estádio III – (Enchimento dos grãos) – (53 a 73);
IV) Estádio IV – (Maturação) – (73 a 109).

No presente estudo, o milho foi até a fase de forrageiro que compreende o estádio II.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, através do teste F, e análise de regressão a 5% de probabilidade de erro, utilizando-se o software Sisvar (Ferreira, 2014).

A comparação das variáveis biométricas e consumo hídrico foi realizada utilizando análise de componentes principais, utilizando o programa R (2008).

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise de crescimento

As análises de variância para AP, DC, NF e AF nas quatros épocas de avaliação estão resumidas na Tabela 3. Verificou-se para variável AP que as concentrações de água residuária ocasionou efeito significativo ($p<0,05$) aos 30 e 45 DAS. Para DC observou-se efeito significativo apenas aos 60 DAS ($p<0,05$). Em relação ao NF, constatou-se efeito significativo aos 30, 45 e 60 DAS ($p<0,05$). Já para variável AF observou-se efeito significativo apenas aos 30 DAS ($p<0,05$).

Tabela 3. Resumo da ANOVA para AP, DC, NF e AF de plantas de milho (cv. IPA BRS-5026) irrigadas com diferentes concentrações de água residuária aos 15, 30, 45 e 60 DAS.

		Quadrado Médio							
		Altura de planta				Diâmetro do caule			
Fontes de variação	GL	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS
% Diluições (D)	4	1,53^{ns}	58,48*	663,53**	621,60^{ns}	0,01^{ns}	0,05^{ns}	0,03^{ns}	0,21**
Bloco	4	11,14**	33,63^{ns}	149,34^{ns}	1034,1^{ns}	0,13*	0,09^{ns}	0,14*	0,11^{ns}
Resíduo	16								
CV	%	11,84	11,93	12,61	17,06	19,12	7,57	9,58	7,93
		Números de folhas				Área foliar			
Fontes de variação	GL	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS
% Diluições (D)	4	0,70^{ns}	7,36**	17,66**	6,34*	90,90^{ns}	2872,02*	8942,96^{ns}	4319,12^{ns}
Bloco	4	0,85^{ns}	1,50^{ns}	0,85^{ns}	3,45^{ns}	107,61^{ns}	18287,44^{ns}	8148,28^{ns}	10895,97*
Resíduo	16								
CV	%	9,76	9,37	11,83	8,95	20,42	24,45	15,01	9,17

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} Não significativo, pelo teste F.

Com relação à altura das plantas aos 30 DAS (Figura 1A), observou-se tendência linear em função do aumento das concentrações de AR, apresentando valor máximo estimado de 38,97 cm na lâmina de 100% AR e mínimo estimado de 32,09 cm na concentração 0% AR, revelando um incremento de 21,44% sobre à testemunha.

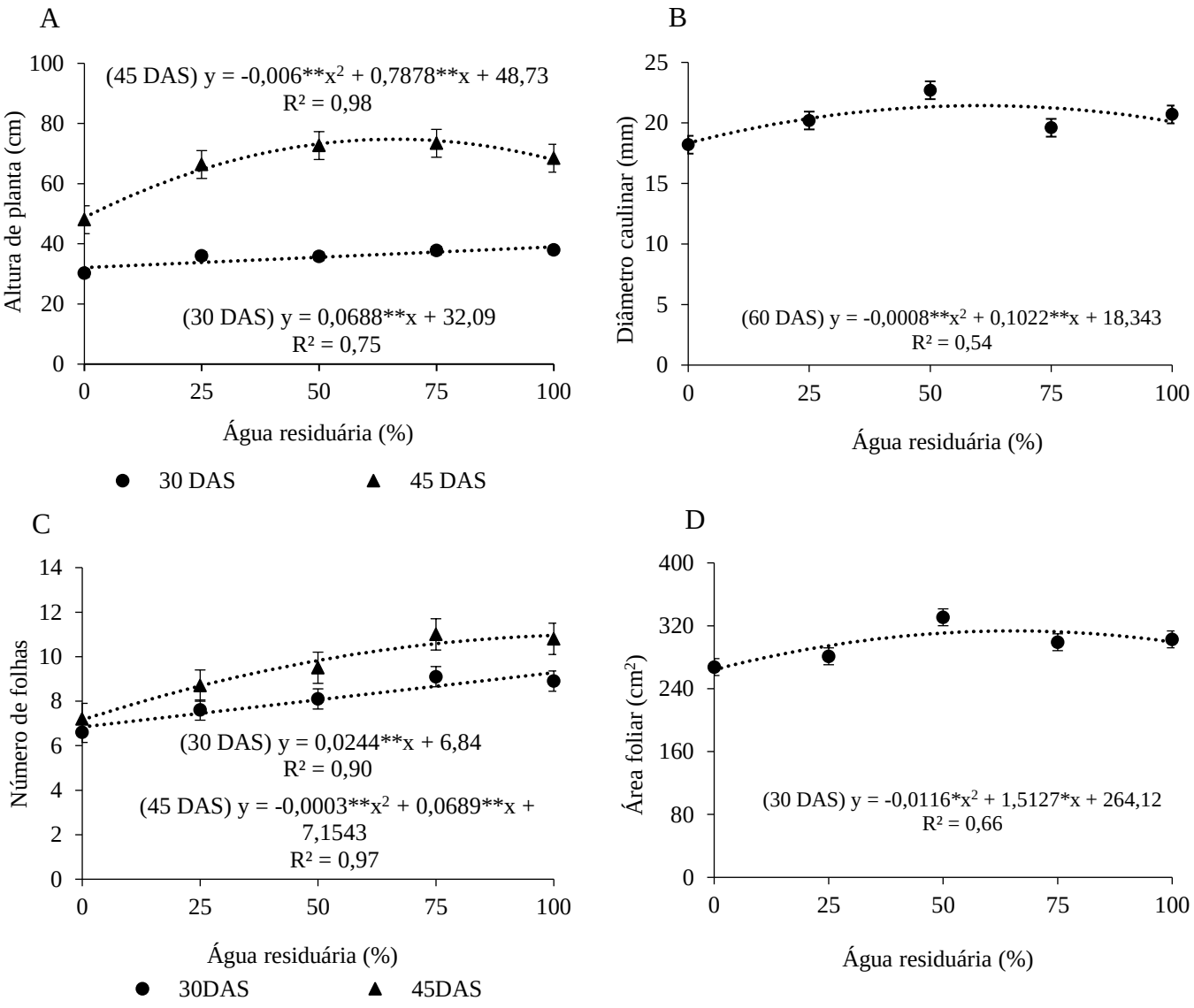
Aos 45 DAS, constatou-se efeito quadrático em função do aumento das concentrações de AR, com máximo estimado de 74,60 cm na concentração de 65,65% AR, obtendo-se um incremento de 53,07% sobre à testemunha. Esses resultados assemelham-se aos encontrados por Costa et al. (2014), avaliando altura de planta do milho aos 40 DAS, em que obteve valor médio de 72,80 cm na concentração de 50% de água residuária tratada.

Observa-se na Figura 1B ajuste quadrático para o diâmetro do caule aos 60 DAS em função das concentrações de AR, constatando-se um incremento de 17,72% quando comparado com a testemunha (0% AR) e a concentração de 63,88% AR, apresentando valor máximo estimado de 21,60 mm.

De acordo com Santos Neto (2012), o caule tem papel relevante, uma vez que quanto maior for o diâmetro, maior será a capacidade da planta armazenar sólidos solúveis, aumentando o rendimento das espigas. Resultados semelhantes foram encontrados por Sousa et al. (2012), que observaram maiores valores de diâmetro caulinar das plantas de milho sob maiores concentrações de biofertilizantes, apresentando valor médio de 23,40 mm. Alves et al.

(2018) avaliaram o crescimento vegetativo de milho em condições de campo, fertirrigado com diferentes doses de água residuária e encontraram valor médio 19,40 mm de diâmetro caulinar quando irrigado com 200% do potássio via água residuária.

Figura 1. Efeito das concentrações de água residuária sobre AP (A) e DC (B), NF (C) e AF (D) do milho (cv. IPA BR-5026) sob condições de ambiente protegido, Recife 2018.



Na Figura 1C observa-se efeito linear crescente em função das concentrações de AR, com valor máximo estimado de 9,28 folhas planta^{-1} na concentração de 100% AR e mínimo estimado de 6,84 folhas planta^{-1}, revelando um incremento de 35,67% em relação à testemunha. Aos 45 DAS, verificou-se que houve efeito quadrático em função das concentrações de AR, constatando-se um acréscimo de 55,30% com valor máximo estimado de 11,11 folhas planta^{-1} na lâmina de 75% AR em relação à testemunha.

Os resultados corroboram com o padrão encontrado na análise de crescimento na cultura do milho por Sotero et al. (2019), com maior produção de número de folhas no tratamento irrigado com 100% de água residuária, apresentando valor médio 9,8 folhas planta^{-1} aos 50 DAS.

Na Figura 1D, constatou-se efeito quadrático da área foliar em função do aumento das concentrações de AR aos 30 DAS, com valor máximo estimado de 313,44 cm^2 na concentração de 65,20% de AR, representando um acréscimo de 18,67% em relação à testemunha.

Acima desta concentração, observou-se uma diminuição da área foliar que se deve possivelmente, ao estresse osmótico e hídrico, os quais são decorrentes do estresse salino no ambiente radicular, o que pode, de acordo com Ayers e Westcot (1999), promover desequilíbrio fisiológico às plantas.

Meneghetti et al. (2012), avaliando o crescimento do milho irrigado com água residuária de suinocultura, obtiveram ajuste quadrático da área foliar com máximo estimado 130 cm^2 aos 30 DAS. Rebouças Neto et al. (2016), também avaliando crescimento da cultura do milho, sob diferentes concentrações de biofertilizante bovino, verificaram que a área foliar apresentou um comportamento quadrático, atingindo valor máximo de 327,12 cm^2 para uma concentração de 73,7% de biofertilizantes.

3.2 Produção de Biomassa

Observa-se na Tabela 4, a análise de variância para MFPA, MSPA, MFR e MSR. As concentrações de água residuária ocasionaram efeito significativo ($p<0,05$) em todas as variáveis analisadas.

Tabela 4. Resumo da ANOVA para MFPA, MSPA, MFR e MSR de plantas de milho (cv. IPA BR-5026) irrigadas com concentrações de efluente doméstico aos 60 DAS.

		Quadrado Médio			
Fontes de variação	GL	MFPA	MSPA	MFR	MSR
% Diluições	4	12144,83*	5935,79*	49185,19*	14217,62*
Bloco	4	6468,30^{ns}	3861,01^{ns}	1217,62^{ns}	1217,62^{ns}
Resíduo	16				
CV	%	19,99	34,27	21,19	32,34

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns}Não significativo, pelo teste F.

Na Figura 2A verifica-se um efeito linear crescente da MFPA em função do aumento da concentração de AR aos 60 DAS, com valores máximos e mínimos estimados de 222,97 g

planta^{-1} e 312,27 g planta^{-1}, nas concentrações (0% AR) e 100% AR, respectivamente, revelando um incremento de 40,05%. Al-Khamisi et al. (2016), avaliando dois ciclos consecutivos de milheto com onze genótipos diferentes da espécie, quando utilizaram 100% de água residuária comprovaram maior rendimento de matéria verde, onde obtiveram no 1 ciclo 11,62 t ha^{-1} e no segundo ciclo 20,22 t ha^{-1}, corroborando com os resultados da presente pesquisa, que nas concentrações (0% AR) e 100% AR apresentou 22,48 t ha^{-1} e 31,48 t ha^{-1} de massa fresca da parte aérea, respectivamente.

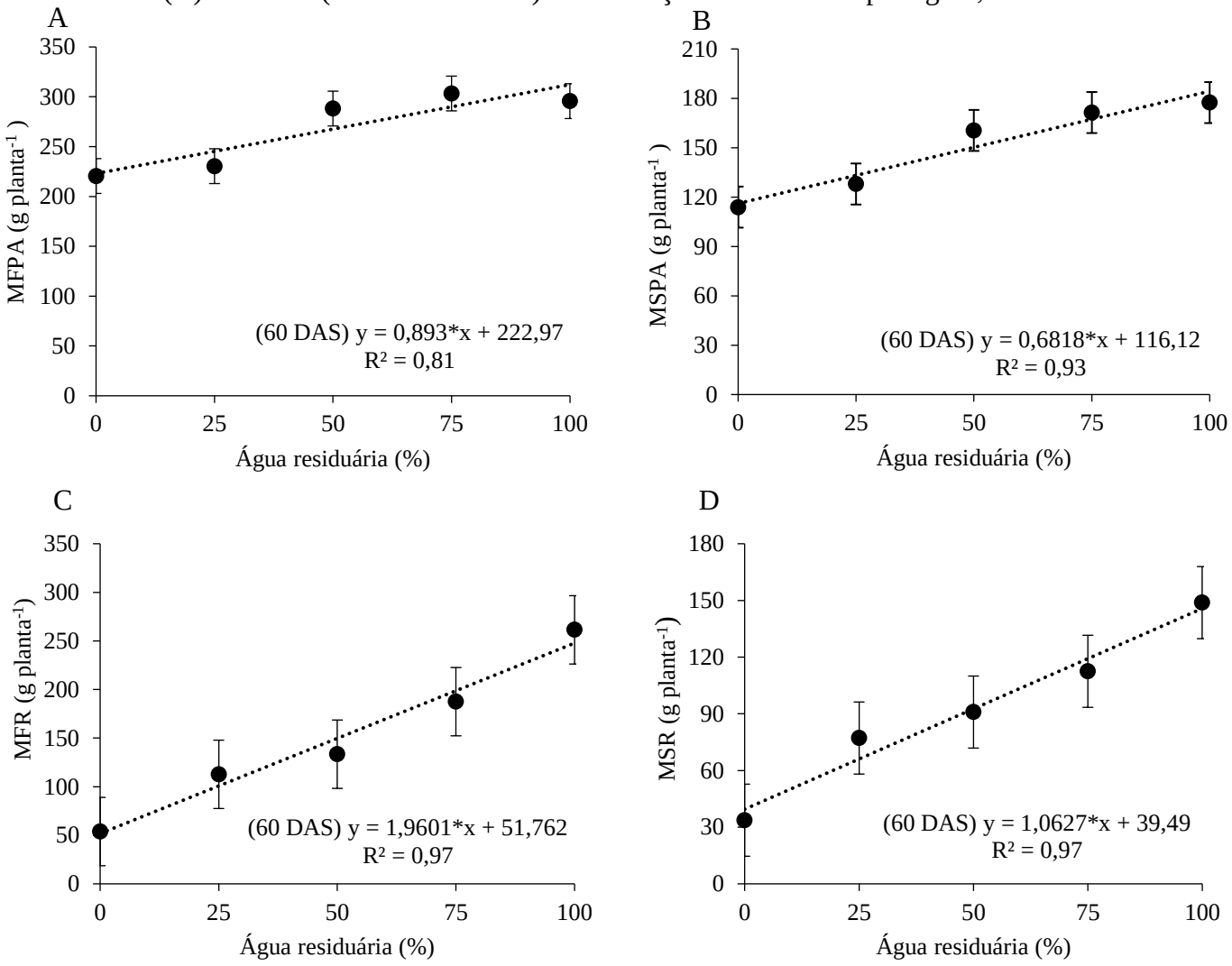
Com relação à MSPA (Figura 2B), notou-se que o melhor ajuste dos dados foi linear crescente em função das concentrações de AR aos 60 DAS. Destaca-se o tratamento 100% AR, com máximo estimado de 184,30 g planta^{-1} e incremento de 58,71% em relação à testemunha, que apresentou 116,12 g planta^{-1}. Kumar (2014), avaliando a produtividade de matéria seca do milho irrigado com efluente industrial de usina de cana-de-açúcar, verificaram que o maior rendimento foi obtido com a concentração correspondente a 40% do efluente industrial, com máximo de 80,59 g planta^{-1}, devido suas maiores concentrações de nutrientes no efluente utilizado. Al-Khamisi et al. (2018), ao determinar a produtividade de variedades de sorgo sobre aplicação de esgoto tratado, constataram valor médio de 13,25 t ha^{-1}; enquanto que o máximo encontrado no presente estudo foi de 18,58 t ha^{-1} na concentração de 100% de AR.

Observou-se na Figura 2C que a MFR apresentou comportamento linear crescente em função do aumento da concentração de AR aos 60 DAS, onde a maior MFR foi obtida com 100% AR, promovendo um máximo estimado de 247,77 g planta^{-1} e mínimo estimado de 51,76 g planta^{-1} na concentração (0% efluente), alcançando um incremento de 378,69% em relação à testemunha.

Para MSR o melhor ajuste também foi linear crescente em função das concentrações de AR aos 60 DAS. Verificou-se valor máximo estimado de 145,76 g planta^{-1} na concentração de 100% AR e mínimo estimado de 39,49 g planta^{-1} na concentração (0% AR), constatando-se incremento de 269,10% sobre a testemunha (Figura 2D).

Possivelmente a presença de maior concentração de água residuária tenha contribuído para o aumento da disponibilidade de nutrientes, resultando em maior crescimento da biomassa radicular. Rebouças Neto et al. (2016), avaliando os efeitos da produção de matéria seca da raiz na cultura do milho com aplicações de biofertilizantes bovino, evidenciaram uma tendência semelhante ao desse estudo sobre a MSR.

Figura 2. Efeito das concentrações de água residuária sobre MFPA (A), MSPA (B), MFR (C) e MSR (D) do milho (cv. IPA BR-5026) sob condições de ambiente protegido, Recife 2018.



3.3 Taxas de crescimento

As análises de variância para TCA_{AP}, TCR_{AP}, TCA_{AF}, TCR_{AF} nas quatro épocas de avaliação, estão resumidas na Tabela 5. Observa-se para variáveis TCA_{AP} e TCR_{AP} que as concentrações de água residuária ocasionaram efeito significativo ($p<0,05$) aos 30 e 45 DAS. Para TCA_{AF}, verifica-se efeito significativo das concentrações de água residuária aos 15, 30 e 60 DAS ($P<0,05$). Em relação TCR_{AF}, constata-se efeito significativo apenas aos 30 e 60 DAS ($p<0,05$).

Tabela 5. Resumo da ANOVA para TCA_{AP}, TCR_{AP}, TCA_{AF} e TCR_{AF} de plantas de milho (cv. IPA BR-5026) irrigadas com concentrações de efluente doméstico aos 15, 30, 45 e 60 dias após a semeadura (DAS).

		Quadrado Médio							
		TCA_{AP}				TCR_{AP}			
Fontes de variação	GL	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS
% Diluições (D)	4	$0,191^{**}$	$1,067^{**}$	$2,106^{ns}$	$5,378^{ns}$	$0,0002^{*}$	$0,0001^{**}$	$0,0002^{ns}$	$0,0003^{ns}$
Bloco	4	$0,167^{*}$	$0,321^{ns}$	$1,599^{ns}$	$3,982^{ns}$	$0,0001^{ns}$	$0,00002^{ns}$	$0,0001^{ns}$	$0,0002^{ns}$
Resíduo	16								
CV	%	15,1	19,75	28,8	22,68	13,12	16,38	20,52	25,86
		TCA_{AF}				TCR_{AF}			
Fontes de variação	GL	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS	15 DAS	30 DAS	45 DAS	60 DAS
% Diluições (D)	4	$77,643^{ns}$	$190,528^{*}$	$12,904^{ns}$	$510,801^{**}$	$0,0001^{ns}$	$0,002^{*}$	$0,00006^{ns}$	$0,002^{**}$
Bloco	4	$8,950^{ns}$	$50,3337^{ns}$	$6,403^{ns}$	$69,298^{ns}$	$0,0002^{ns}$	$0,001^{ns}$	$0,0004^{ns}$	$0,0002^{ns}$
Resíduo	16								
CV	%	26,87	30,53	27,24	35,63	12,89	24,23	28,59	28,74

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns}Não significativo, pelo teste F.

Analisando a Figura 4A, observa-se tendência quadrática da TCA_{AP} em função do aumento da concentração de AR aos 15 e 30 DAS respectivamente, apresentando valor máximo estimado de 1,54 cm dia^{-1} na concentração de 74,44% de AR, correspondendo a um acréscimo de 48,08% em relação à testemunha. Aos 30 DAS constata-se máximo estimado de 2,37 cm dia^{-1} na concentração de 62,83% de AR, revelando um incremento de 100,85% sobre à testemunha. Ramos et al. (2018) avaliaram os índices fisiológicos na cultura do milho fertirrigado com urina humana e doses de manipueira e encontraram um valor médio para TCA_{AP} de 3,59 cm dia^{-1} quando avaliado dos 15 aos 65 DAS.

Para TCR_{AP} verifica-se ajuste linear em função da concentração de AR aos 15 DAS (Figura 4B), apresentando valor máximo estimado de 0,061 na concentração de 100% AR, e mínimo estimado de 0,051 cm dia^{-1} na concentração (0% AR), revelando incremento de 19,45% em relação à testemunha. Ao analisar aos 30 DAS verifica-se comportamento quadrático em função das concentrações de AR, com máximo estimado de 0,046 cm dia^{-1}, na concentração de 62,50% de AR, e incrementos de 50,65% em relação à testemunha. Resultado semelhante foi obtido por Ramos et al. (2018) na cultura do milho para TCR_{AP}, correspondente a 0,047 cm dia^{-1}.

A época quando se obteve os maiores valores da TCR_{AP} do milho foi aos 15 DAS, o que corresponde à primeira época de avaliação. Tal crescimento acentuado pode ser explicado pelo início da aplicação dos tratamentos com concentrações de efluente doméstico na água de irrigação, bem como do surgimento de folhagem para a realização do processo fotossintético, visto que as plantas se encontravam na fase vegetativa inicial.

O declínio da TCR_{AP} aos 30 DAS de estudo pode ser devido ao fato que a planta estava próxima da fase de florescimento. Larcher (2000) afirma que paralisações no crescimento vegetativo em função da aceleração do crescimento produtivo ocorre pela canalização da energia, de nutrientes e assimilados para a floração.

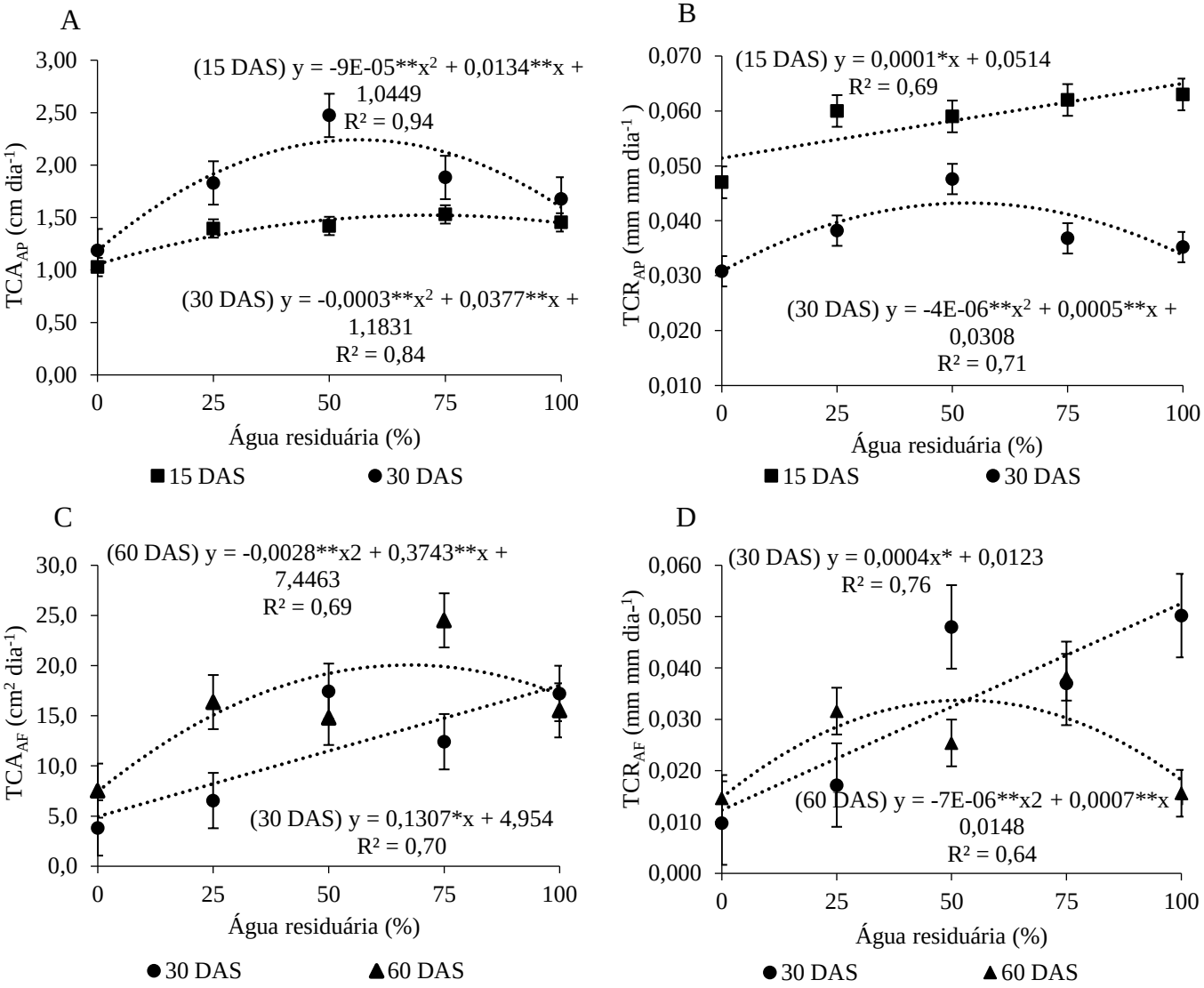
Em relação à TCA_{AF}, verificou-se aos 30 DAS ajuste linear crescente em função das concentrações de AR (Figura 4C). Constata-se máximo de 18,04 cm^2 dia^{-1} na concentração de 100% de AR, e mínimo de 4,95 cm^2 dia^{-1} na concentração (0% AR), com incremento 264,44% sobre à testemunha. Observou-se aos 60 DAS comportamento quadrático em função da concentração de AR, com valor máximo de 19,95 cm^2 dia^{-1} na concentração de 66,84% de AR, correspondendo a um acréscimo de 167,78% em relação à testemunha.

Ressalta-se que maiores valores aos 60 DAS da TCA_{AF} podem ser explicados pelo fato do acúmulo de nutrientes oriundo das concentrações da água residuária na irrigação. As plantas de milho ganham volume em altura e em diâmetro do caule, o que contribui para o aumento da área foliar e as taxas fotossintéticas. Com o aumento das taxas fotossintéticas, em termos absolutos, uma maior quantidade de fotoassimilados ficaria disponibilizada para o crescimento em área foliar.

Na Figura 4D, verificou-se comportamento linear crescente aos 30 DAS para TCR_{AF} em função da concentração de AR, com máximo de 0,052 cm^2 dia^{-1} e mínimo de 0,0123 cm^2 dia^{-1}, um aumento de 322,76% em relação à testemunha. Aos 60 DAS, observou-se comportamento quadrático em função das concentrações de AR, com valor máximo de 0,032 cm^2 dia^{-1} na concentração de 50% de AR, revelando acréscimo de 128,71% sobre à testemunha.

Os dados de TCA_{AF} e TCR_{AF} apresentados são corroborados por Costa et al. (2009), em estudo sobre áreas foliares do milho, quando verificaram que o solo foi irrigado com água residuária, as áreas foliares foram maiores às das plantas irrigadas com água de abastecimento aos 20, 34 e 62 DAS, respectivamente. Atribui-se tais resultados ao efeito residual dos nutrientes, contidos na água residuária.

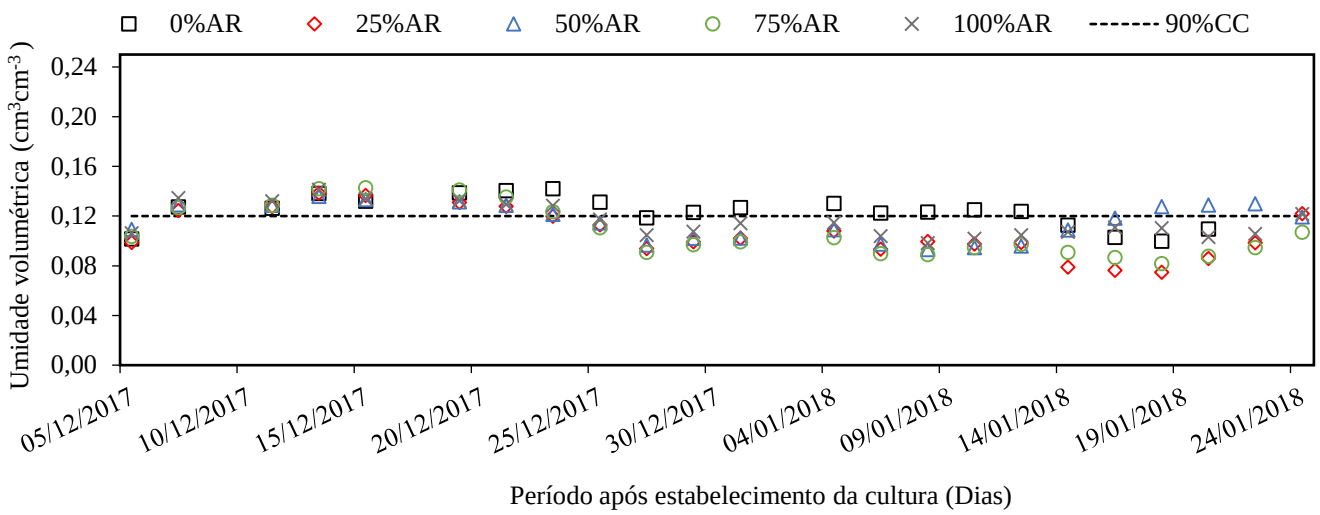
Figura 4. Efeito das concentrações de água residuária sobre as TCA_{AP} (A), TCR_{AP} (B), TCA_{AF} (C) e TCR_{AF} (D) aos 15, 30, 45 e 60 DAS na cultura do milho (cv. IPA BR-5026) sob condições de ambiente protegido, Recife 2018.



3.4 Evapotranspiração da cultura e consumo hídrico

As variações da umidade do solo (θ) para as diferentes concentrações de água residuária na cultura do milho (cv. IPA BRS-5026) estão apresentadas na Figura 5. A linha pontilhada representa o valor de θ correspondente a 90% da capacidade de campo (CC), e que serviu de referência para reposição de 90% da ETc. A demanda por água para cada tratamento variou em resposta às diferentes perdas por evapotranspiração.

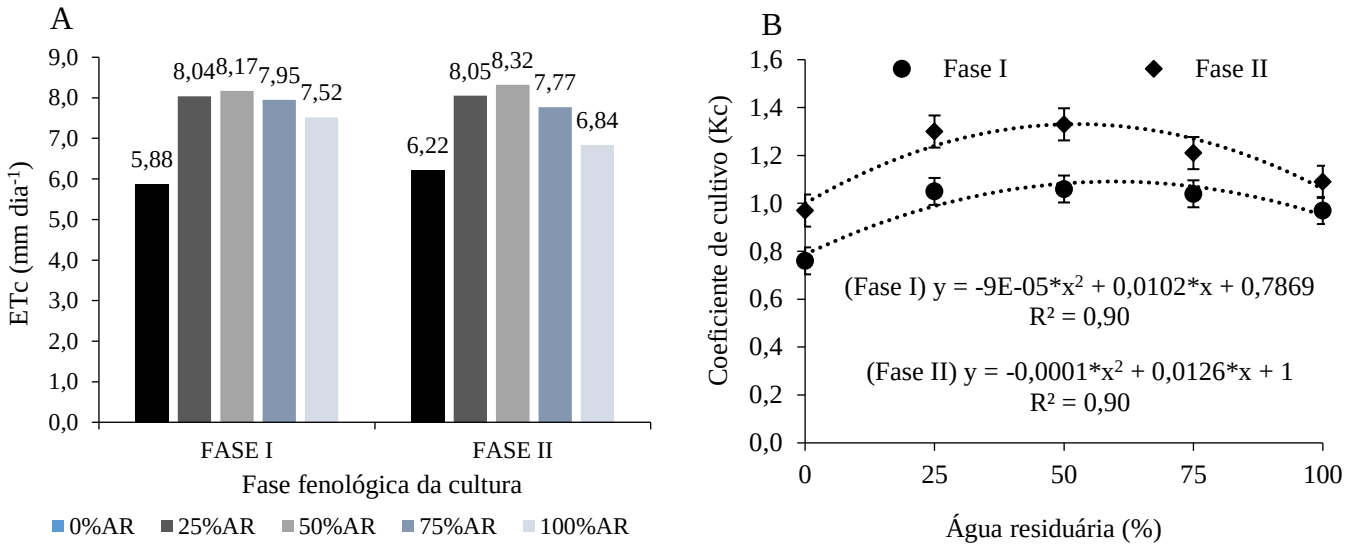
Figura 5. Variação da umidade volumétrica média do solo durante o experimento.



Na Figura 6A, observa-se de forma geral, dentre os tratamentos com diferentes concentrações de água residuária, que as plantas irrigadas com concentração de 50% AR apresentaram maior ETc, com valor médio na fase I de 8,17 mm dia^{-1} e 8,32 mm dia^{-1} na fase II, evidenciando uma maior taxa evapotranspirométrica, havendo decréscimos de 2,69% e 7,95%; 6,61% e 17,78% da ETc em relação à 75% AR e 100% AR, nas fases I e II, respectivamente. Tal fato pode estar associado a baixa condutividade elétrica e concentração de sódio presente nessa concentração de água residuária em relação aos outros tratamentos, possibilitando assim uma maior absorção de água. Segundo Allen et al. (2006), altas concentrações de salinidade reduzem a evapotranspiração da cultura, já que afeta o crescimento das plantas.

Observa-se também que a maior ETc acumulada foi de 164,51 mm no tratamento com concentração de 50% AR e menor ETc na concentração de 100% de AR, correspondendo a um valor de 145,68 mm, para uma ETo acumulada de 145,31 mm. Os valores também demonstraram diferença de 18,83 mm entre os dois tratamentos no consumo de água durante todo o ciclo da cultura.

Figura 6. Requerimento de água do milho (*Zea mays*) relativo à cada fase de desenvolvimento (A) e coeficiente de cultivo (B) em função das concentrações de água residuária, em condições de ambiente protegido, Recife, 2018.



Verifica-se na Figura 6B que o Kc durante a fase I apresentou valor máximo estimado de 1,08 na concentração de 56,67% de AR, com acréscimo de 38,46% em relação à testemunha. Durante a fase II o Kc máximo estimado correspondeu a 1,40 com concentração de 63% de AR, revelando incremento 40% em relação à testemunha. A partir dessas concentrações estimadas para ambas as fases, o consumo hídrico apresenta decréscimo com aumento da concentração de AR. Essa constatação é devido à diminuição do consumo d'água com o aumento da salinidade da água de irrigação.

Vários fatores podem e são normalmente condicionados a essa redução da evapotranspiração das culturas, ocasionada pela irrigação com água residuária de alta concentrações de sais, dentre os quais, diminuição do potencial osmótico do solo, formação de crostas na superfície do solo e efeitos nocivos devido à toxidez de certos sais, como o cloreto de sódio, e desequilíbrios nutricionais, principalmente na área foliar. Tendências semelhantes foram encontrados por (Figueirêdo et al., 2009; Freire et al., 2011; Silva et al. 2014) quando se observou redução dos Kc's quando irrigado com maiores concentrações de sais.

Na Tabela 6 verifica-se que os Kc's encontrados para todos os tratamentos na fase I foram maiores que os fornecidos pela FAO (Allen et al. 2006). Comportamento semelhante para os

Kc's ocorreu durante a fase II, exceto no tratamento 100% AR que foi encontrado coeficiente próximo aos da FAO, apresentando um Kc semelhante na fase de floração.

Vale salientar que as variações observadas nos valores de Kc's indicam a necessidade de sua determinação local, devido a sua dependência em relação ao clima, solo, cultivar e tipo de tratamento aplicado (Ferreira et al., 2007). Para o milho, Souza et al. (2015) encontraram valores de 0,90 e 1,30 para as fases vegetativa e floração, respectivamente, em condições do semiárido pernambucano.

Os Kc's médios para o tratamento irrigado com 100% de AB foram inferiores a todos os tratamentos com concentração de água residuária, decorrente da menor evapotranspiração da cultura do milho quando irrigado com água de abastecimento, refletindo no seu desenvolvimento. A condição do ambiente protegido pode ter interferido no menor coeficiente de cultivo apresentado, pois segundo Rosemberg et al. (1989) o uso de coberturas plásticas em cultivos intensivos pode reduzir em até 30% o consumo de água pelas culturas devido a atenuação (absorção e reflexão) da radiação solar incidente, resultando na redução no balanço de radiação interna e consequentemente menor evapotranspiração com relação ao ambiente externo.

Tabela 6. Coeficiente de cultivo médio obtidos pela metodologia da FAO e pelos tratamentos de concentração de água residuária para a cultura do milho (cv. IPA-BR 5026), em condições de ambiente protegido, Recife 2018.

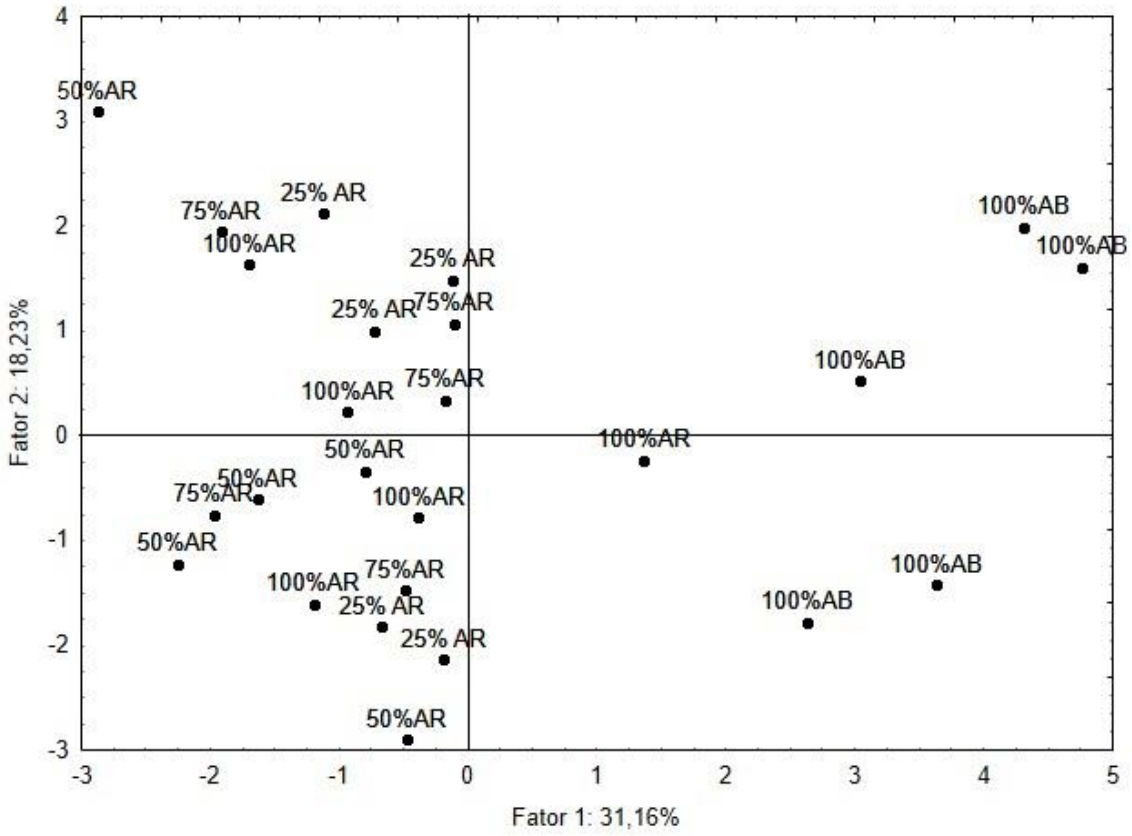
Fases	0%AR	25%AR	50%AR	75%AR	100%AR	FA0-56
I	0,76	1,05	1,06	1,04	0,97	0,70
II	0,97	1,30	1,33	1,21	1,09	1,14

3.5 Relação entre as variáveis biométricas e consumo hídrico

Na Figura 7 são apresentados os dados da análise de componentes principais (ACP) que relaciona as variáveis biométricas com consumo hídrico. Verificou-se pelo gráfico de scores que foram encontradas duas componentes principais (CP) que explicam 31,16% da variância dos dados. Pode ser observado de forma bastante destacada que os dados com concentração de água residuária dominaram a variância e que existiu uma diferença de comportamento das variáveis analisadas quando se utilizou as concentrações de AR em comparação com o tratamento de 100% AB, apresentando uma fraca relação quando irrigado com água de abastecimento em crescimento e consumo hídrico.

Diante do exposto, verifica-se que o uso das concentrações de água residuária ao solo como fonte de fertilizantes proporcionou aumento das variáveis fenológicas aqui estudadas, evidenciando que os nutrientes existentes neste resíduo foram bem aproveitados pelas plantas contribuindo para o seu desenvolvimento.

Figura 7. Análise de componentes principais das variáveis biométricas e consumo hídrico em função das concentrações de água residuária aos 60 DAS.



4.0 CONCLUSÕES

A água residuária constitui uma fonte potencialmente importante no desenvolvimento do milho quando irrigado com maiores concentrações de água residuária associada com água de abastecimento.

O incremento na concentração de água residuária no solo promoveu redução na evapotranspiração da cultura e consumo hídrico.

Os coeficientes de cultivos (Kc's) encontrados em todas as concentrações de água residuária para o milho são superiores aos da FAO-56.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, J. **Evapotranspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298 p. (Estudio Riego e Drenaje Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO – Irrigation and Drainage Paper, 56).

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters.** Rome: FAO, 1982. 68 p. (Irrigation and Drainage Paper, 39).

AL-KHAMISI, S. A.; AL-JABRI, N. M.; NADAF, S. K.; AL-HARTHY, A. S. Productivity of forage triticale genotypes under treated wastewater and fresh water irrigation. **Journal of Agriculture Innovations and Bioresearch**, v.3, n.3, p.190-200, 2018.

AL-KHAMISI, S. A.; AL-JABRI, N. M.; NADAF, S. K.; AL-HARTHY, A. S. Response of Selected Forage Pearl Millet Genotypes Treated Wastewater and Fresh Water Irrigation Productivity. **Journal of Agriculture Innovations and Research**, v.5, p.2319-2433, 2016.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014.

ALVES, P. F. S.; SANTOS, S. R. DOS.; KONDO, M. K.; ARAÚJO, E. D.; OLIVEIRA, P. M. DE. Fertirrigação do milho com água residuária sanitária tratada: crescimento e produção. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v.23, n.5, p. 833-839, 2018.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade de água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, FAO, 1999, 153p. (Estudos Irrigação e Drenagem, 29 revisado).

BARROS, A. H. C. Agência Embrapa de Informação Tecnológica: **Árvore do conhecimento - Território Mata Sul Pernambucana – Clima**. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/territorio_mata_sul_pernambucana/arvore/CONT000fbz2ztdp02wx5eo0sawqe3h68l5n4.html. Acesso em: 12 junho 2018.

BENINCASA, M. M. P. **Análise de crescimento de plantas: noções básicas**. Jaboticabal: FUNEP, 2003. 42 p.

CARVALHO, D. F. DE; CRUZ, E. S. DA; SILVA, W. A. DA; SOUZA, W. DE J.; SOBRINHO, T. A. Demanda hídrica do milho de cultivo de inverno no Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.112-118, 2006.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JUNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco.** 2ª Aproximação. Recife – Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA, 2008. 212p.

CONAB - **Companhia Nacional de Abastecimento.** Série histórica das safras (2018). Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historicas-das-safras. Acesso em: 12 de junho de 2019.

COSTA, Z. V. B. DA.; GURGEL, M. T.; COSTA, L. R.; ALVES, S. M. C.; FERREIRA NETO, M.; BATISTA, R. O. Efeito da aplicação de esgoto doméstico primário na produção de milho no assentamento Milagres (Apodi-RN). **Revista Ambiente e Água**, v.9, n.4, p.737-751, 2014.

COSTA, F. X.; LIMA, V. L. A. DE; BELTRÃO, N. E. DE M.; AZEVEDO, C. A. V. DE; SOARES, F. A. L.; ALVA, I. D. M. de. Efeitos residuais da aplicação de biossólidos e da irrigação com água residuária no crescimento do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, n.6, p.687-693, 2009.

DANTAS, D. DA. C.; SILVA, Ê. F. DE F. E.; ROLIM, M. M.; SILVA, M. M. DA.; MORAIS, J. E. F. DE.; LIRA, R. M. Production components of sunflower plants irrigated with treated domestic wastewater and drinking water in semiarid region. **Revista Ceres**, v.66, n.1, p.34-40, 2019.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. 2nd ed. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília -DF: Embrapa, 2017. 574 p.

FRANCIS, C. A.; RUTGER, J. N.; PALMER, A. F. E. A Rapid Method for Plant Leaf Area Estimation in Maize (*Zea mays* L.). **Crop Science**, v.9, n.5, p.537-539, 1969.

FEITOSA, S. O.; SILVA, S. L.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C. M.; FEITOSA, E. O. Crescimento do feijão caupi irrigado com diferentes concentrações efluente tratado e água salina. **Revista técnico-cientifica agrícola**, v.36, n.1, p.146-155, 2015.

FERREIRA, V. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; MASCHIO, R.; CARDOSO, M. J.; SILVA, C. R.; MORAIS, E. L. C. Coeficientes de cultivo do milho em sistemas monocultivo e consorciado com feijão-caupi. In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2007, Aracajú. Anais... Piracicaba: **SBAGRO**, 1998. 1 CD-ROM.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.2, p.109-112, 2014.

FREIRE, J. L. DE O.; CAVALCANTE, L. F.; REBEQUI, A. M. DIAS, T. J.; SOUTO, A. G. DE. L. Necessidade hídrica do maracujazeiro amarelo cultivado sob estresse salino, biofertilização e cobertura do solo. **Revista Caatinga**, v.24, n.1, p.82-91, 2011.

FIGUEIRÊDO, V. B.; MEDEIROS, J. F. DE.; ZOCOLER, J. L.; ESPINOLA SOBRINHO, J. Evapotranspiração da cultura da melancia irrigada com água de diferentes salinidades. **Engenharia Agrícola**, v.29, n.2, p.231-240, 2009.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 28/03/2019.

JACOBI, P. R.; GRANDISOLI, E. **Água e Sustentabilidade desafios, perspectivas e soluções**. São Paulo: IEE-USP e Reconectta, 2017.

JIANG, X.; KANG, S.; TONG, L.; LI, S.; DING, R.; DU, T. Modeling evapotranspiration and its components of maize for seed production in an arid region of northwest China using a dual crop coefficient and multisource models. **Agricultural Water Management**, v.222, p.105-117, 2019.

KUMAR, V. Sugar Mill Effluent Utilization in the Cultivation of Maize (*Zea mays* L.) in Two Seasons. **Journal of Waste Management**, v.1, p.1-12, 2014.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Paulo, EPU. 526 p. 2000.

MALAFAIA, G.; RODRIGUES, A. S. DE L.; ARAÚJO, F. G. DE.; LEANDRO, W. M. Teor de nutrientes em folhas de milho fertilizado com vermicomposto de lodo de curtume e irrigado com água residuária doméstica. **Revista Ambiente e Água**, v.10, n.4, p.801-809, 2016.

MENEGHETTI, A. M.; NÓBREGA, L. H. P.; SAMPAIO, S. C.; FERQUES, R. G. Mineral composition and growth of babycorn under swine wastewater combined with chemical fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1198–1205, 2012.

RAMOS, J. G.; LIMA, V. L. A. DE.; SALES, E. S. G.; MEDEIROS, G. O. DE.; PEREIRA, M. DE O.; GUIMARÃES, R. F. B.; BORGES, V. E.; SOBRINHO, T. G.; RAMOS, G. G. Growth of Fertilized Maize via Fertirrigation and Foundation With Treated Human Urine and Cassava Wastewater. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.5, p. 188-197, 2018.

R Development Core Team. R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna. 2008.

REBOUÇAS NETO, M. DE O.; LEITE, D. N. P.; CAMPOS, J. R.; VERAS, C. L.; SOUZA, I. R. DE.; MONTEIRO FILHO, L. R. Crescimento inicial do milho sob diferentes concentrações de biofertilizante bovino. **Cadernos Cajuína**, v.1, n.3, p.4-14, 2016.

ROSEMBERG, N. J.; MCKENNEY, M. S.; MARTIN, P. Evapotranspiration in a greenhousewarmed world: a review and simulation. **Agricultural and Forest Agrometeorology**, v.47, p. 303-320, 1989.

SANTOS, D. P. DOS, SANTOS, C. S. DOS.; SILVA, L. M. DA.; SANTOS, M. A. L. DOS.; SANTOS, C. G. dos. Performance of methods for estimation of table beet water requirement in Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.22, n.3, p.189-193, 2018.

SANTOS, C. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, M. A. L.; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiration and crop coefficients of *Moringa oleifera* under semiarid conditions in Pernambuco**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.12, p.840-845, 2017.

SANTOS NETO, I. J. **Cultivares de milho e lâminas de irrigação para produção de minimilho em Vitória da Conquista-BA**, 2012. 66f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Vitória da Conquista, 2012.

SILVA, A. O. DA; KLAR, A. E.; SILVA, Ê. F. DE F. E.; CUNHA, A. R. Evapotranspiração e coeficiente de cultivo para a beterraba sob estresse salino em ambiente protegido. **Irriga**, v.9, n.3, p.375-389, 2014.

SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; ZOLNIER, S.; SOARES, J. M.; VIEIRA, V. J. S.; GOMES JÚNIOR, W. F. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.64-71, 2012.

SILVA, L. C. **Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais**. Campina Grande: EMBRAPA – CNPA, 2006, 61p.

SOUZA, L. S. B. DE.; MOURA, M. S. B. DE.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. DA. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura do milho e feijão-caupi em sistemas exclusivo e consorciado. **Revista Caatinga**, v.28, n.4, p.151 – 160, 2015.

SOUSA, G. G. DE.; MARINHO, A. B.; ALBUQUERQUE, A. H. P.; VIANA, T. V. DE A.; AZEVEDO, B. M. DE. Crescimento inicial do milho sob diferentes concentrações de biofertilizante bovino irrigado com águas salinas. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.2, p.237-245, 2012.

SOTERO, A. R. H.; BATISTA, R. O.; OLIVEIRA, M. K. T. DE.; OLIVEIRA, F. DE A. DE.; RODRIGUES FILHO, R. A.; MENDES, H. C.; LAVÔR, W. K. B. DE.; SILVA, A. D. DA. Growth and Production of Millet Irrigated With Dilutions of Treated Gray Water. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.3, p.504-514, 2019.

VILLA-NOVA, N. A.; OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SBRH, 1981. p.281-299.

XU, G.; XUE, X.; WANG, PU.; YANG, Z.; YUAN, W.; LIU, X.; LOU, C. Lysimeter study for the effects of different canopy sizes on evapotranspiration and crop coefficient of summer maize. **Agricultural Water Management**, v.208, p.1-6, 2018.

ZHANG, D.; LI, W.; XIN, C.; TANG, W.; ENEJI, A. E.; DONG, H. Lint yield and nitrogen use efficiency of field-grown cotton vary soil salinity and nitrogen application rate. **Field Crops Research**, v.138, p.63-70, 2012.

CAPITULO III

Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes coberturas de solo em condições de campo e ambiente protegido

MODELAGEM DA DINÂMICA DE UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES COBERTURAS DE SOLO EM CONDIÇÕES DE CAMPO E AMBIENTE PROTEGIDO

RESUMO

A umidade do solo é uma importante variável para o controle de processos hidrológicos que atuam em diferentes escalas espaciais e temporais, no qual o monitoramento e a modelagem tornam-se indispensáveis, para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e água. Diante do exposto, objetivou-se modelar a umidade do solo através do Modelo Matemático Hydrus-1D em diferentes coberturas de solo em condições de campo e ambiente protegido. O estudo contemplou as etapas de monitoramento da umidade do solo, caracterização física e hidrodinâmica do solo, calibração e modelagem da dinâmica da umidade do solo em três condições de coberturas (Solo descoberto, Cultivo de moringa e Cultivo de milho), durante os anos de 2015 e 2017/2018. A umidade do solo nas três condições de cobertura do solo apresentou os maiores valores durante o período chuvoso e maiores eventos de irrigação. No entanto, os valores não se aproximaram da saturação. A maior variabilidade da umidade do solo foi observada nos meses mais secos dos respectivos anos analisados. O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de forma adequada a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para os diferentes tipos de solo na profundidade de 20 cm, nas respectivas condições de coberturas de solo. Na validação as principais incertezas nas simulações com o modelo Hydrus foram observadas na parcela experimental com cultivo de moringa e milho, devido à variação dos parâmetros de transpiração de vegetação e evaporação do solo. A eficiência do modelo Hydrus variou de 84 a 97%, com RMSE máximo de 0,01% e concordância de 100%. Os valores estimados de ETr foram 150,65 e 137,84 mm para moringa e milho, respectivamente. O Hydrus-1D mostrou-se capaz de prever cenários de evapotranspiração real e identificação de períodos de déficit hídrico na simulação do ciclo da moringa e do milho.

Palavras-Chave: parâmetros hidrodinâmicos, gestão de recursos hídricos, manejo de irrigação, Hydrus 1D.

MODELING SOIL MOISTURE DYNAMICS IN DIFFERENT SOIL COVER UNDER FIELD CONDITIONS AND PROTECTED ENVIRONMENT

ABSTRACT

Soil moisture is an important variable for the control of hydrological processes that act on different spatial and temporal scales, in which monitoring and modeling become essential, to support soil and water management and conservation actions. Based on the above, the objective was to model the soil moisture through the Hydrus-1D Mathematical Model in different soil cover under field conditions and protected environment. The study included the steps of soil moisture monitoring, soil physical and hydrodynamic characterization, calibration and modeling of soil moisture dynamics under three cover conditions (uncovered soil, moringa cultivation and corn cultivation) during the years 2015 and 2017/2018. Soil moisture in the three soil cover conditions presented the highest values during the rainy season and the largest irrigation events. However, the values did not approach saturation. The highest variability of soil moisture was observed in the driest months of the respective years analyzed. The Hydrus-1D model was able to adequately simulate soil moisture dynamics over time for different soil types at a depth of 20 cm under the respective soil cover conditions. In the validation, the main uncertainties in the Hydrus model simulations were observed in the experimental plot with moringa and corn cultivation, due to the variation of vegetation transpiration and soil evaporation parameters. The efficiency of the Hydrus model ranged from 84 to 97%, with a maximum RMSE of 0.01% and 100% agreement. The estimated ETr values were 150.65 and 137.84 mm for moringa and corn, respectively. Hydrus-1D was able to predict real evapotranspiration scenarios and identify water deficit periods in the simulation of the moringa and corn cycle.

Keywords: hydrodynamic parameters, water resources management, irrigation management, Hydrus 1D.

1.0 INTRODUÇÃO

Compreender a varibilidade temporal da umidade do solo é essencial para gerenciamento dos processos hidrológicos e planejamentos de manejo de irrigação, uma vez que esta variável desempenha um papel fundamental na gestão de recursos hídricos, incluindo a evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial e erosão, regulando os mecanismos de

troca de água e de energia na interface solo-planta-atmosfera (Daly e Porporato, 2005; Tyagi et al., 2011).

Os altos custos envolvidos nas pesquisas de campo e os avanços computacionais têm contribuído para ampliar a utilização dos modelos matemáticos, possibilitando simulação do movimento de água no solo. Porém, vale ressaltar que as medições de campo são indispensáveis, uma vez que os modelos matemáticos necessitam de calibrações e validações locais para corretamente simular cenários (Peake et al., 2013).

O modelo matemático HYDRUS-1D é um dos mais usados na estimativa do processo de percolação de água e lixiviação de compostos químicos na zona vadosa do solo, particularmente em estudos de recarga e contaminação de aquíferos (Chaves, 2009), e pode ser utilizado para analisar o movimento de água e solutos em meios não saturados, parcialmente saturados e/ou totalmente saturados. O fluxo é controlado pelas condições de contorno (carga hidráulica, condições atmosféricas e drenagem livre), e as equações que regem o fluxo e o transporte são resolvidas numericamente por elementos finitos (Simunek et al., 2009).

Com base na necessidade e importância de estudos hidrológicos no Nordeste brasileiro foi criada em 2001 a Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA), formada por pesquisadores das Universidades da Região Nordeste (UFPB, UFCG, UFAL, UFPE, UFRPE, UFRN, UFC/FUNCEME). Logo após, criou-se o Projeto de Implantação de Bacias Experimentais do Semiárido (IBESA) e o Projeto Bacias Experimentais e Representativas do Semiárido (BEER) que, de forma integrada, desenvolveram atividades de pesquisa comuns, caracterizando as ações de grupos de pesquisadores através do engajamento com os propósitos do REHISA, implantando e desenvolvendo estudos em bacias experimentais e representativas na região do Nordeste brasileiro e aplicando metodologias unificadas (Ursulino et al. 2019).

Pesquisas com o modelo Hydrus-1D vem sendo frequentemente realizadas em estudos da simulação da dinâmica da umidade do solo, apresentando grande potencial como alternativa de planejamento agrícola e gerenciamento de recursos hídricos em diferentes escalas espaciais (Monteiro et al. 2009; Silva et al. 2015; Shao et al. 2018; Montenegro et al. 2019; Ursulino et al. 2019).

Vale ressaltar que a região semiárida do Brasil em particular ainda é carente de informações da dinâmica de água no solo, bem como da hidrodinâmica da umidade do solo em condições de ambiente protegido. Neste contexto, o monitoramento e a modelagem temporal tornam-se indispensáveis para subsidiar ações de manejo e conservação do solo e

água, e para quantificar os componentes do balanço hídrico, uma vez que a disponibilidade no solo está diretamente ligada à disponibilidade hídrica na atmosfera, que é controlada por processos de evaporação e transpiração.

Diante do exposto, objetivou-se modelar a dinâmica de umidade do solo através do Modelo Matemático Hydrus-1D em diferentes coberturas de solo em condições de campo e ambiente protegido.

2.0 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

2.1.1 Condições de campo

O estudo em condições de campo foi realizado em duas unidades experimentais: Mimoso e Mutuca-PE. A unidade experimental do Mimoso está situada nas seguintes coordenadas UTM: 0733983 e 9071150, município de Pesqueira-PE. A Bacia do Mimoso encontra-se inserida na Bacia Representativa do Alto Ipanema, que é uma das sub-bacias investigadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA). A unidade experimental de Mutuca está localizada sob as seguintes coordenadas: (7º 15' 18" S; 35º 52' 40" W; 550 m). A Bacia do Ipojuca possui uma nascente em Mutuca, Distrito do município de Pesqueira-PE, próxima à Estação de Tratamento e REÚSO Hidroagrícola (Figura 1A).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região da Bacia do Mimoso é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido). A precipitação média histórica anual, conforme dados históricos local (1910 a 2012) é de 671,90 mm (Silva et al., 2013). De acordo com os dados normais climatológicos, a evaporação total anual é de 1.589,80 mm e temperatura média de 24,70 °C. De acordo com Silva et al. (2012), os solos de referência da Bacia Representativa do Alto Ipanema são: Argissolos Amarelo, Argissolos Vermelho-Amarelo, Neossolos Flúvico, Regolítico e Litólico.

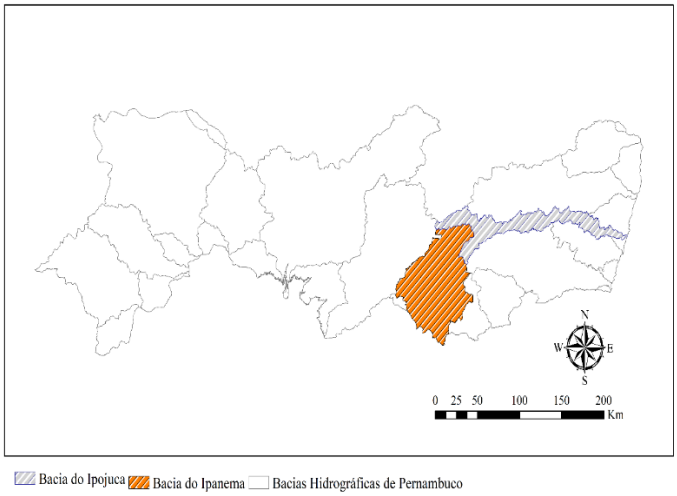
O clima da região da Bacia do Ipojuca em Mutuca-PE, é classificado como As (com o verão seco) de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al., 2013), com temperatura média de 27ºC, precipitação média anual de 670 mm e evapotranspiração média em torno de 1800 mm ano^{-1} (Santos e Montenegro, 2012). Na bacia hidrográfica do rio Ipojuca predominam as classes de solos Planossolos, Regossolos, Podzólicos Amarelo e Vermelho-Amarelo e Solos Litólicos, além de significativas áreas de Afloramentos de Rocha.

2.1.2 Condições de ambiente protegido

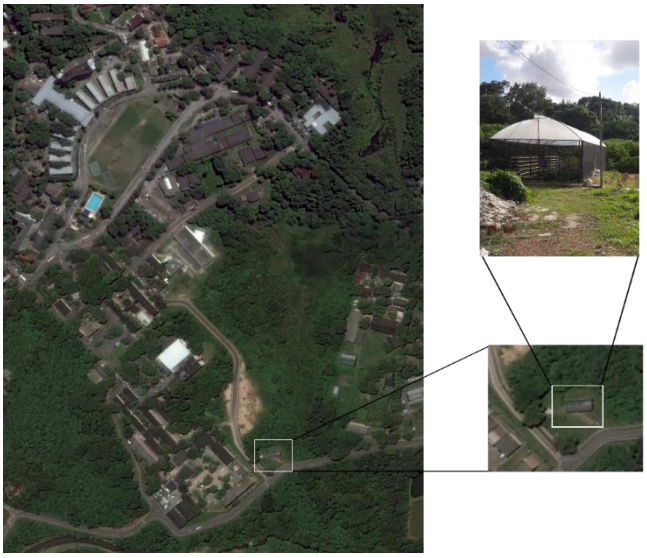
O ensaio em condições de ambiente protegido foi desenvolvido na Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, campus Recife, sob as seguintes coordenadas geográficas: (08º 01’ 07’’ e 34º 56’ 53’’ WGr, e altitude de 6,5 m) (Figura 1B).

Figura 1. Localização da área de estudo na bacia do Mimoso e bacia do Ipojuca-PE (A) e em condições de ambiente protegido-UFRPE (B).

A



B



Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação ao clima sob as condições de ambiente protegido – UFRPE/Recife, é classificado como tropical chuvoso (tipo As’ a Ams’) com temperatura média anual de 27 ºC e precipitação anual acima de 1700 mm (Silva et al., 2012b), sendo que a concentração de chuvas ocorre entre o outono e o inverno entre os meses de abril e julho, com sua média pluviométrica de 248,2 mm. A evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 mm ano^{-1} e 1.600 mm ano^{-1} (Barros, 2011).

2.2 Monitoramento Hidrológico

2.2.1 Umidade do solo

As parcelas experimentais na bacia do Mimoso com dimensões de 4,5 m e 11,0 m (no sentido do declive) foram instaladas em dezembro de 2009, perfazendo uma área de 49,5 m². Após a delimitação das parcelas, foi mantida uma parcela com solo descoberto no qual foi

realizado o monitoramento da umidade do solo através de sondas de Nêutrons (modelo CPN 503 DR), na profundidade de 20 cm.

Na bacia do Ipojuca o monitoramento da umidade do solo foi realizado através de tensiômetros de leitura digital, instalados nas profundidades de 20 cm, com cultivo de *Moringa oleífera* Lam. Para condições de ambiente protegido as umidades foram determinadas por meio da variação da pesagem direta dos vasos com cultivo de milho (*Zea mays* L.).

Os valores de tensão obtidos foram transformados em conteúdo volumétrico de água no solo com base na curva de retenção.

Na Tabela 1 são apresentadas as características físicas e hidráulicas dos solos nas áreas investigadas.

Tabela 1. Características físicas e hidráulica das áreas de estudo

Tipos de solos	Horiz.	Prof. (cm)	Areia (%)	Argila (%)	Silte (%)	Ds (g cm^{-3})	Ks (cm dia^{-1})
Argissolo Amarelo	Ap	0-20	34,24	29,09	36,67	1,73	321,36
Planossolo Háplico	B	0-20	83,92	12,44	3,64	1,43	195,60

Ds - densidade do solo e Ks - Condutividade hidráulica do solo saturado

Na Figura 2 é apresentada uma vista parcial das condições de coberturas investigadas (solo descoberto, cultivo de moringa e cultivo de milho).

Figura 2. Condições de cobertura vegetal na bacia do Mimoso (A), bacia do Ipojuca (B), ambiente protegido/UFRPE (C).

2.2.2 Variáveis climatológicas

Os dados agroclimatológicos da Bacia do Mimoso e Ipojuca foram medidos através de Estações Climatológicas Total Automática (Campbell Scientific/Onset). As estações são dotadas de um conjunto de sensores e uma interface de comunicação para transferência de

dados, que incluem: um anemômetro para medir a velocidade e direção do vento, um pluviômetro, um sensor de temperatura e umidade relativa do ar e um piranômetro para medir a radiação solar.

O monitoramento de cada variável é realizado de hora em hora, diariamente, e obtido através da determinação da média dos dados coletados por 24 h. A evapotranspiração potencial (ETo) diária foi estimada através da equação de FAO-Penman-Monteith (Allen et al.,1998).

A estimativa da evapotranspiração potencial (ETo) no interior da casa de vegetação foi medida no evaporímetro de Piché (ETpi), calculada por diferença do nível de água no tubo graduado em milímetros entre dias subsequentes, segundo Villa-Nova e Ometto (1981).

2.3 Modelo Hydrus-1D

2.3.1 Formulação matemática para fluxo

O fluxo de água no solo considerado pelo software Hydrus-1D é descrito pela equação de Richards para o fluxo unidimensional para meio não saturado, incorporando o termo (S) relativo à extração de água pelas raízes, contemplando a evapotranspiração, conforme a Equação 1:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left[K\left(\frac{\partial h}{\partial x} + \cos\alpha\right)\right] - S \qquad (1)$$

Em que: h é a carga hidráulica (L), θ é o conteúdo volumétrico de água no solo ($L^3\ L^{-3}$), t é o tempo (T), K é a condutividade hidráulica ($L\ T^{-1}$), x é a coordenada espacial (L), α é o ângulo de direção do fluxo e o eixo vertical (α = 0 ° para fluxo vertical, α = 90° para fluxo horizontal, e α = 0°< α < 90°para fluxo inclinado) e S é o termo de extração de água pela raiz ($L^3\ L^{-3}\ T^{-1}$).

O modelo utiliza a equação de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980) para determinar a relação entre condutividade não saturada, a umidade volumétrica e o potencial mátrico do solo, como segue Equação 2:

$$\theta v = \theta r + \frac{\theta s - \theta r}{[1+(\alpha|\Psi m|)^n]^m} \qquad (2)$$

em que: θr o teor de umidade residual do solo [$L^3\ L^{-3}$], θs o teor de água do solo na saturação [$L^3\ L^{-3}$], h é a carga de pressão ou potencial matricial [L], e α, n e m são parâmetros de ajuste do modelo.

O parâmetro empírico de ajuste da curva m é obtido pela relação m = 1 – (1/n), proposta por Mualem (1976). A função de condutividade hidráulica pode ser escrita como na Equação 3:

$$K = K_S S_e^x \left[1 - \left(\left(1 - S_e^{x/m}\right)\right)^m\right]^2 \quad (3)$$

Em que: x é o parâmetro de inclinação (Mualem, 1976), sendo adotado o valor de 0,5, para a maioria dos solos, e Ks é a condutividade hidráulica saturada do solo.

2.3.2. Parâmetros de entrada e calibração do modelo

A condição de contorno superior foi especificada conforme a precipitação, a irrigação e os valores particionados da evapotranspiração em transpiração e evaporação.

Para o desmembramento dos termos potenciais de evaporação do solo (Ep) e transpiração (Tp), foi adotado o modelo proposto por Vanclooster et al. (1994).

O modelo estima a evaporação potencial, em função do índice de área foliar (IAF), e da evapotranspiração potencial da cultura, segundo as Equações 4 e 5:

$$E_P = exp^{(-0{,}6IAF \times ETp)} \quad (4)$$

$$T_p = ETp - Ep \quad (5)$$

em que: IAF é o índice de área foliar; ETp é a taxa de evaporação potencial, LT^{-1} e Tp - taxa de transpiração potencial, LT^{-1}.

Neste estudo, foram adotados os valores de índice de área foliar (IAF) da moringa de acordo dados experimentais de Santos (2015) e da cultura do milho com base nos dados experimentais de Santos (2019).

A curva de retenção de água nos diferentes tipos de solos foi determinada em laboratório por meio do extrator de Richards e ajustada pelo modelo de van Genuchten (1980). Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros de ajuste estimados para o modelo de van Genuchten (1980).

Tabela 2. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água para o material de solo utilizado: Argissolo Amarelo e Planossolo Háplico.

Tipo de solo	θs	θr	α	n	R^2
Argissolo Amarelo	0,30	0,02	3,631	1,132	0,98
Planossolo Háplico	0,33	0,04	15,01	1,55	0,83

θs - umidade de saturação; θr - umidade residual; α - parâmetro alfa de van Genutchen; n - parâmetro de ajuste experimental

As simulações nas parcelas experimentais das respectivas bacias hidrográficas (Mimoso e Ipojuca) foram realizadas para um período 54 dias no ano de 2015. Foram utilizados 32 dias para calibração e 22 dias para validação. Em relação à simulação em ambiente protegido, foi realizada no período de 54 dias no ano de (Dez de 2017 a Jan 2018). Utilizou-se 32 dias para calibração do modelo e 22 dias para validação.

Com base nos dados de campo (textura do solo, curva característica e condutividade hidráulica), realizou-se o processo de calibração do modelo. Os parâmetros calibrados podem ser vistos na Tabela 3. Para condição de contorno superior nos perfis dos solos nas diferentes coberturas, utilizou-se fluxo variável de eventos diários de chuva e de evapotranspiração, enquanto que para condição de contorno inferior considerou-se a drenagem livre, exceto para condição com cultivo de milho que não teve condição de contorno inferior por ser em vaso. Para inicialização do modelo utilizou-se a primeira leitura umidade medida nos respectivos equipamentos de umidade em ambas áreas experimentais. Para discretização dos dados, considerou-se apenas a camada subsuperficial (0-20 cm).

Os dados de textura (Tabela 1) foram inseridos no Hydrus-1D. Posteriormente, realizou-se a calibração através de ajustes dos parâmetros do modelo de van Genuchten, e da condutividade hidráulica do solo saturado (Tabela 2).

Tabela 3. Parâmetros de calibração do modelo para as diferentes condições de coberturas.

Cobertura	Θs (cm^3 cm^{-3})	Θr (cm^3 cm^{-3})	α	n	Ks (cm dia^{-1})	I
Solo Descoberto	0,28	0,08	0,036	1,56	5	0,5
Cultivo de Moringa	0,43	0,08	0,036	1,56	100	0,5
Cultivo de Milho	0,21	0,065	0,075	1,89	106	0,5

θr - umidade residual do solo, θs - umidade de saturação do solo, α e n - parâmetros da equação de van Genuchten, Ks - Condutividade hidráulica saturada do solo, I - parâmetro de tortuosidade da função de condutividade hidráulica.

2.4 Análise Estatística

O modelo foi avaliado com base no Erro Quadrático Médio (RMSE), Coeficiente de Concordância (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NS) (Zeng et al., 2014), conforme Equações (6), (7) e (8):

$$RMSE = \left\{\frac{1}{n}\left[\sum_{i=1}^{n}(Xi - Yi)^2\right]\right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi-Yi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(|Xi-m|+|Yi-m_e|)^2}\right] \quad (7)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi-Yi)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Xi-m)^2} \quad (8)$$

em que: Xi é o valor medido, Yi é o valor estimado, n é o número de observações, m é o valor médio dos dados medidos e m_e é o valor médio dos dados estimados. Os valores do Erro Quadrático Médio (RMSE), do Índice de Concordância (d) e da Eficiência de modelagem NashSutcliffe (NS) medem a precisão do modelo, e variam de 0,0 a 1,0. Quanto mais próximo a zero (0) for o valor de RMSE, mais preciso é o modelo. Já o índice de concordância (d) e a Eficiência de modelagem Nash-Sutcliffe (NS) indicam que o modelo é mais preciso quando os mesmos aproximam-se de um (1).

2.5 Estimativa da ETr da moringa e do milho com o Hydrus-1D

Após o ajuste dos parâmetros hidrodinâmicos do solo, foram realizadas simulações do balanço hídrico para a cultura da moringa e do milho nos diferentes ambientes, ao ano de 2015 e 2017/2018, respectivamente, a fim de verificar a aplicabilidade do modelo para previsão de necessidade hídrica da cultura. De acordo com Antonino et al. (2000), uma das formas de avaliar o estado hídrico a que está submetida uma cultura é através da relação entre a evapotranspiração real (ETr) e a Evapotranspiração potencial da cultura (ETc). Se houver água disponível no solo e o fluxo de água na planta atender à demanda atmosférica, a ETr será igual a ETc. Se houver restrição de água no solo e a demanda atmosférica não for atendida, ETr será menor que ETc (Reichardt e Timm, 2004). Ainda segundo os autores, a situação ideal para uma cultura é que ETr seja igual a ETc, e sempre que ETr < ETc haverá restrição de água e a produtividade poderá ser afetada. Dessa forma, foram avaliados os resultados da evapotranspiração potencial da cultura e da evapotranspiração real da moringa e do milho, estimados pelo Hydrus-1D.

O Hydrus-1D incorpora na equação de fluxo (Equação 1) a função de extração de água pelo sistema radicular, *S*, definida como o volume de água extraído pela planta de uma unidade de volume representativo do solo por unidade de tempo. A extração de água do solo como uma função empírica do conteúdo de água do solo foi apresentada inicialmente por Feddes et al.

(1976) e aprimorada por Feddes, Kowalik e Zaradny (1978), considerando-a função do potencial matricial do solo (Santos, 2011; Alves, 2009). De acordo com o modelo de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978), *S* é definido como exposto na Equação 9:

$$S(z) = \propto (h)\, S_{max}(z) \qquad (9)$$

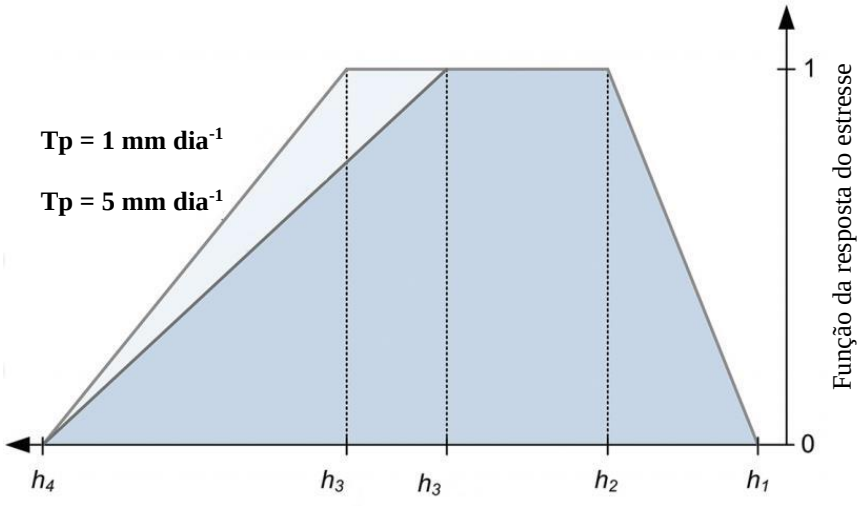
sendo: α (h) uma função de redução da transpiração ou da extração, que é função do potencial matricial do solo h; e S_{zmax}, a extração máxima ou potencial de água pelas raízes, que, seguindo o balanço de massa e negligenciando a água na planta, é obtida pela Equação 10:

$$T_p = \int_{Lr} S_{max}(z)\partial z \rightarrow S_{max} = \frac{T_p}{L_r} \qquad (10)$$

em que: Tp [L T^{-1}] é a transpiração potencial; e Lr [L], a profundidade máxima do sistema radicular.

Para resolução da extração de água pela raiz, o Hydrus-1D utiliza cinco potenciais propostos por Feddes, Kowalik e Zaradny (1978), conforme a Figura 3.

Figura 3. Função da resposta do estresse de água em função do potencial matricial do solo para baixa e alta transpiração potencial, Tp = 1 mm.dia^{-1} e Tp = 5 mm.dia^{-1}, respectivamente. Adaptado de Šimůnek e Hopmans (2009).



A função de redução de transpiração, α (Ψm), varia no intervalo ($0 \leq \alpha \leq 1$). De acordo com Santos (2011), α é igual a zero quando o potencial matricial do solo for superior a Ψ1 (deficiência de oxigênio) ou inferior a Ψ4 (ponto de murcha permanente). Quando o potencial matricial estiver entre Ψ2 e Ψ3 (pontos de redução), α é igual a unidade, assim a

transpiração/extração ocorre à taxa máxima. Para valores do potencial matricial entre Ψ3 e Ψ4, α diminui linearmente. O parâmetro Ψ3 é comumente conhecido como valor crítico ou limitante e representa o ponto a partir do qual as condições hidráulicas limitam a extração de água pelas raízes (Santos, 2011).

O Hydrus-1D assume dois valores para o Ψ3: um para transpiração alta e outro para transpiração baixa. Alves (2009) aborda com maiores detalhes os valores do Ψ3 utilizados pelo modelo, apresentando também a nomenclatura e o cálculo para obtenção dos diferentes potenciais no modelo, segundo Equações abaixo:

$$h1 = P0 \quad (11)$$

$$h2 = P0_{pt} \quad (12)$$

$$h3 = \left\{P2H + \frac{P2L-P2H}{r2H-r2L} \times \left(r2H - T_p\right) \qquad para\ r2L < T_p < r2H\right\} \quad (13)$$

$$h3 = P2L\ para\ T_p \leq r2L \quad (14)$$

$$h3 = P2H\ para\ T_p \geq r2H \quad (15)$$

$$h4 = P0 \quad (16)$$

De acordo com Alves (2009), P2H é o potencial na qual as raízes param de extrair água do solo à taxa máxima (assumindo uma transpiração potencial r2H = 5 mm.dia^{-1}) e P2L é o potencial na qual as plantas param de extrair água do solo à taxa máxima (assumindo uma transpiração potencial r2L = 1 mm.dia^{-1}).

Para a simulação foram utilizados os dados da cultura da moringa e do milho obtidos através do experimento de Santos (2015) e Santos (2019) em Planossolo Háplico e em condições de ambiente protegido na UFRPE/Recife, respectivamente. A simulação foi realizada utilizando os potenciais do modelo de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) para extração de água pela raiz (Tabela 4).

Tabela 4. Valores do potencial de extração de água pela raiz para a cultura da moringa e do milho.

Potenciais (Feddes, Kowalic e Zaradny, 1978)	h1	h2	h3		h4
Potenciais no Hydrus 1D	P0	P0pt	P2H	P2L	P3
Valor adotado para Moringa (cm)	0	-1	-500	-800	-16000
Valor adotado para Milho (cm)	-10	-25	-500	-1000	-8000

A evapotranspiração da cultura foi particionada em evaporação potencial e transpiração potencial através do modelo proposto por Vanclooster et al. (1994) (Equações 5 e 6). Assim,

para a estimativa da transpiração real da planta, o modelo utiliza a transpiração potencial com base na redução de Feddes, Kowalik e Zaradny (1978) e para estimativa da evaporação real o Hydrus-1D utiliza a mínima pressão superficial do solo permitida (*hCritA*) e a umidade do solo (Šimůnek et al., 2009). Finalmente, a evapotranspiração real é estimada pelo somatório da evaporação real e transpiração real.

Os dados de entrada no modelo foram a precipitação (mm dia^{-1}), a evapotranspiração potencial da cultura (mm dia^{-1}) particionada, umidade volumétrica do solo (cm^3 cm^{-3}) e a discretização do crescimento da raiz. Para cultura da moringa adotou-se 70 cm da zona radicular e 30 cm para o milho.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Condições climáticas em campo e ambiente protegido

A distribuição da precipitação total mensal nos períodos analisados juntamente com a irrigação e a evapotranspiração potencial (ETo) da Bacia do rio Mimoso, Ipojuca e em condições de ambiente protegido, são apresentadas na Figura 4.

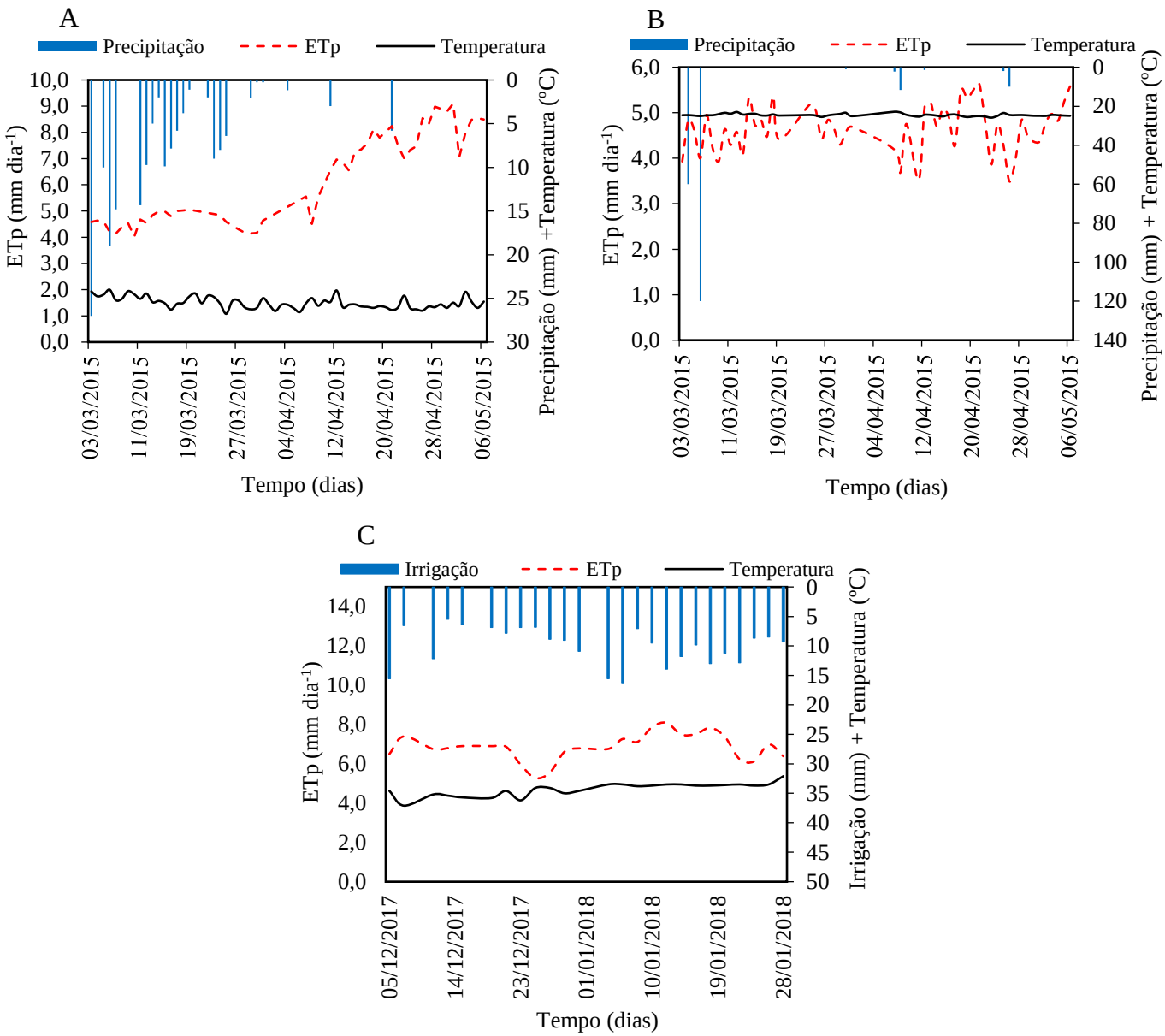
Na Figura 4A e 4B, observa-se que há diferença entre o regime dos totais mensais precipitados nas diferentes bacias hidrográficas. Para bacia do rio Mimoso, durante o período analisado em 2015 a precipitação acumulada foi de 168,26 mm, enquanto que na bacia do rio Ipojuca nesse mesmo período analisado a precipitação acumulada foi de 208,20 mm, podendo-se observar precipitações mais intensas nessa bacia. A irrigação acumulada correspondeu a 367,30 mm para o período analisado.

Ainda na Figura 4A e 4B pode-se observar que, o comportamento da evapotranspiração potencial estimada pelo método de Penman-Monteith, condiz com os eventos chuvosos que ocorreram. Na Figura 4A, os menores valores de ETo foram observados no mês de março, exatamente quando ocorreram os maiores eventos de precipitação. Durante este período, a ETo variou de 4,02 a 5,05 mm dia^{-1}, com média de 4,59 mm dia^{-1} e acumulada de 333,75 mm. Em relação ao mês de abril, quando as chuvas foram menores, a ETo variou 4,17 a 9,10 mm dia^{-1}, com média de 7,36 mm dia^{-1}. Na Figura 4B observa-se que a ETo apresentou grande variação durante todo período analisado, de 3,49 a 5,63 mm dia^{-1} e valor médio de 4,65 mm dia^{-1}.

Na Figura 4C, verifica-se uma lâmina total acumulada de 251,11 mm de dezembro de 2017 a janeiro de 2018 em condições de ambiente protegido no cultivo do milho. Ressalta-se que houve variação da ETo de 5,08 a 8,50 mm dia^{-1}, com média de 6,86 mm dia^{-1}.

Ressalte-se que altas taxas de temperaturas e radiação solar são fatores determinantes na evapotranspiração potencial, influenciando significativamente na variação durante o dia, como observado nas séries históricas (Figura 4).

Figura 4. Variação temporal da precipitação/irrigação/temperatura do ar e evapotranspiração potencial diária na bacia do mimoso (A), bacia do Ipojuca (B) e ambiente protegido (C).



3.2 Dinâmica da umidade em condições de campo e ambiente protegido

Analisando o comportamento da dinâmica de umidade do solo em função da precipitação (Figura 5A), observa-se que os eventos de chuva durante o mês de abril proporcionam, de modo geral, respostas rápidas da variação na umidade do solo, contribuindo com maiores valores de

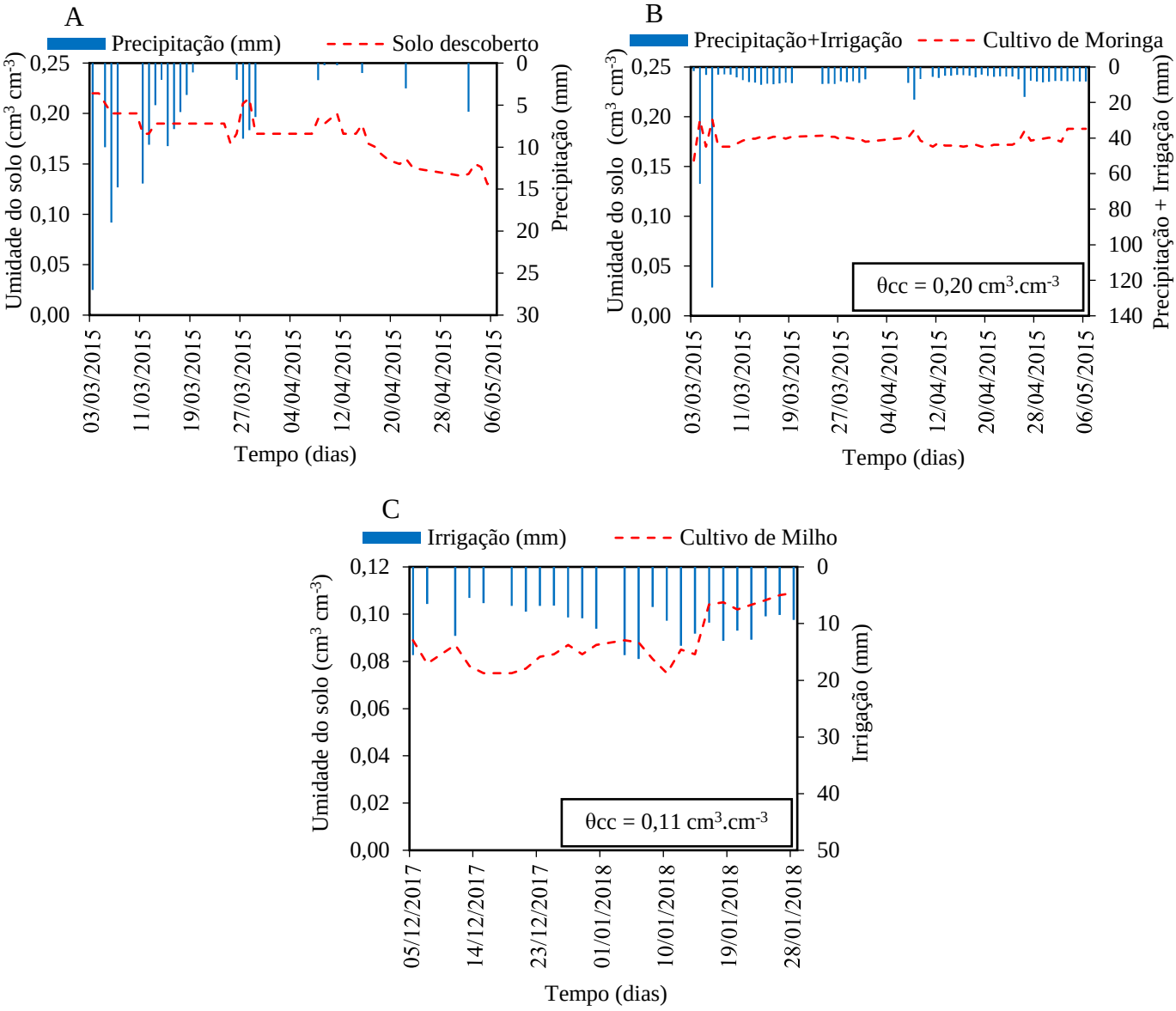
umidade nesse período, ocorrendo redução no mês de abril quando começa a cessar os eventos de chuvas. Na Figura 5B, verifica-se que os eventos de precipitação associado com a irrigação concentrados no início do mês de março proporcionaram os maiores picos de umidade no solo, mantendo a umidade do solo ao longo do período analisado, visto a suplementação das lâminas de irrigação.

A condição de solo com cultivo da moringa apresentou valores de umidade superior à condição de solo descoberto na maior parte do período, com exceção em alguns curtos períodos, que possivelmente está associado a manutenção da umidade devido a maior distribuição de chuvas na bacia do rio mimoso. Ressalta-se que os valores de umidade do solo com cultivo da moringa se aproximaram da umidade de saturação do solo com variação observada de 0,16 a 0,19 cm^3 cm^{-3} e pico de 0,20 cm^3 cm^{-3}, diferente dos valores de umidade medido com solo descoberto que variaram de 0,22 a 0,13 cm^3 cm^{-3} e maior pico verificado de 0,22 cm^3 cm^{-3}.

Comportamento semelhante foram encontrados por Silva et al. (2015) em estudo da variabilidade temporal da umidade do solo sob diferentes tipos de cobertura, que evidenciam que parcelas com cobertura natural apresentaram maiores valores de umidade em relação as parcelas com solo descoberto. De acordo com Santos et al. (2011), a condição de solo descoberto possui menor rugosidade hidráulica do fluxo superficial, com consequente geração de escoamento superficial e menor infiltração de água no solo.

Na Figura 5C, é possível notar que quanto maior foi a lâmina de irrigação maiores foram os conteúdos de água no solo. A umidade do solo variou entre 0,07 a 0,10 cm^3 cm^{-3} e pico máximo de 0,11 cm^3 cm^{-3}, favorecendo o desenvolvimento do milho em ambiente protegido no período analisado.

Figura 5. Dinâmica da umidade do solo em diferentes tipos de coberturas na bacia do mimoso (A), na bacia do Ipojuca (B) e ambiente protegido (C).



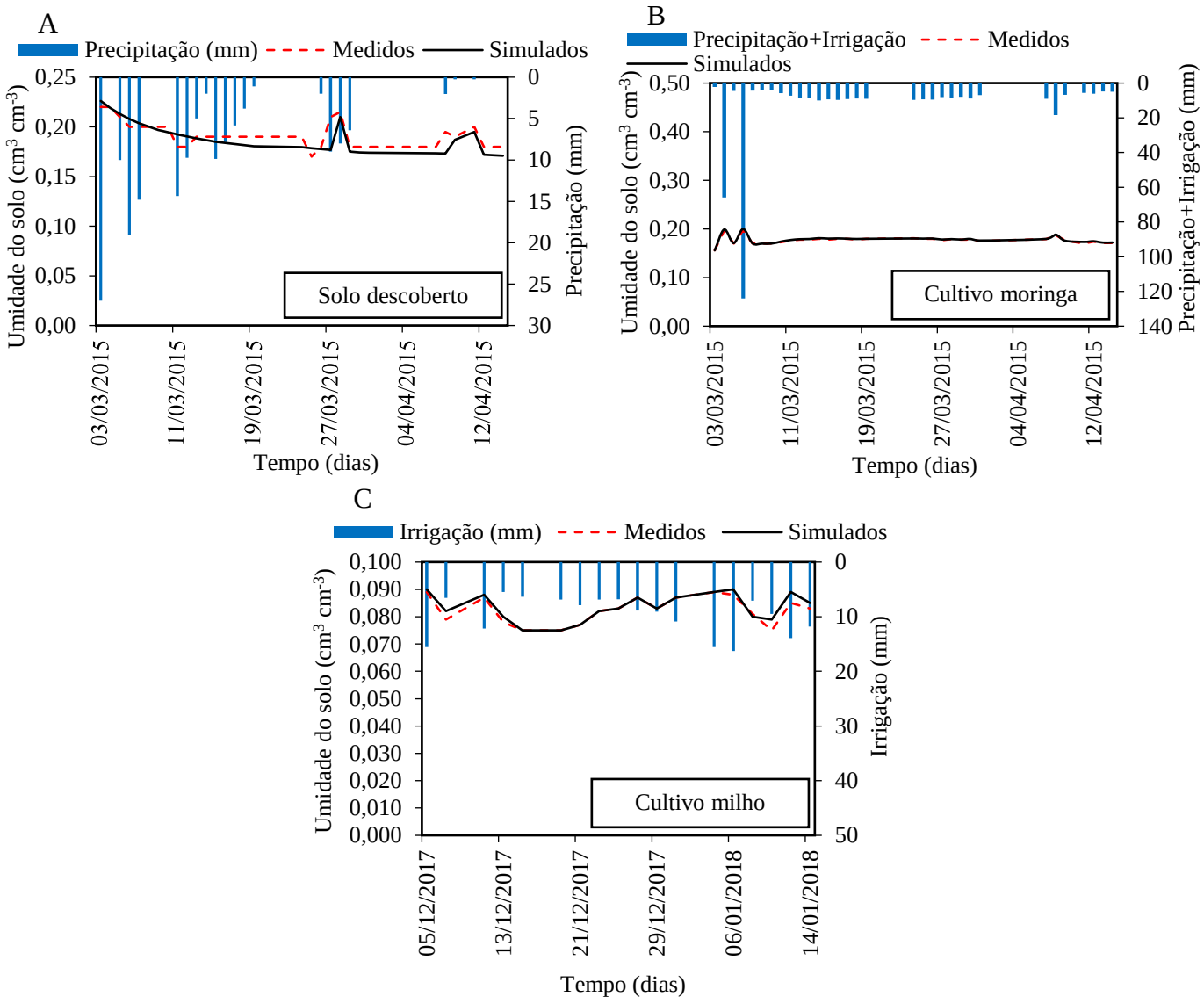
3.3 Calibração e ajuste do modelo em condições de campo e ambiente protegido

Os valores diários medidos e simulados da umidade do solo, para a condição do solo descoberto (Figura 6A) apresenta tendência de redução devido as altas demandas evapotranspirométricana na bacia do mimoso. Em condições do cultivo de moringa (Figura 6B) apresentou tendência aumento da umidade do solo ao longo do tempo, devido as contribuições das precipitações/irrigação. O modelo respondeu melhor para maioria dos

eventos de chuva em condição de solo descoberto em comparação ao solo com cultivo de moringa, que não conseguiu simular alguns picos de irrigação, porém ambos resultados foram satisfatórios para o período analisado, conforme os índices adotados.

Phogat et al. (2018), em estudo realizado em Adelaide na Austrália, confirmam a adequada performancedo modelo HYDRUS 1D em simular a umidade do solo em textura argilosa, com valores bem próximos entre simulado e medido. Os autores ainda afirmam que diferenças entre medido e simulado podem ser causados por diversos fatores, sendo eles: características de distribuição de raízes, heterogeneidade textural e medições de campo.

Figura 6. Comparação entre os valores de umidade medidos e simulados na profundidade de 20 cm; Solo descoberto (A) e cultivo de Moringa (B) e cultivo de Milho (C).



Em relação aos valores medidos e simulados em condições de ambiente protegido com cultivo de milho (Figura 6C), observa-se boa resposta dos picos de umidade do solo durante todo período analisado. Zeng et al. (2014) analisaram e modelaram a umidade do solo sob diferentes regimes de irrigação em um Distrito de Irrigação da Mongólia, na China, e observaram que o modelo Hydrus-1D simulou com precisão a dinâmica da água ao longo do perfil do solo.

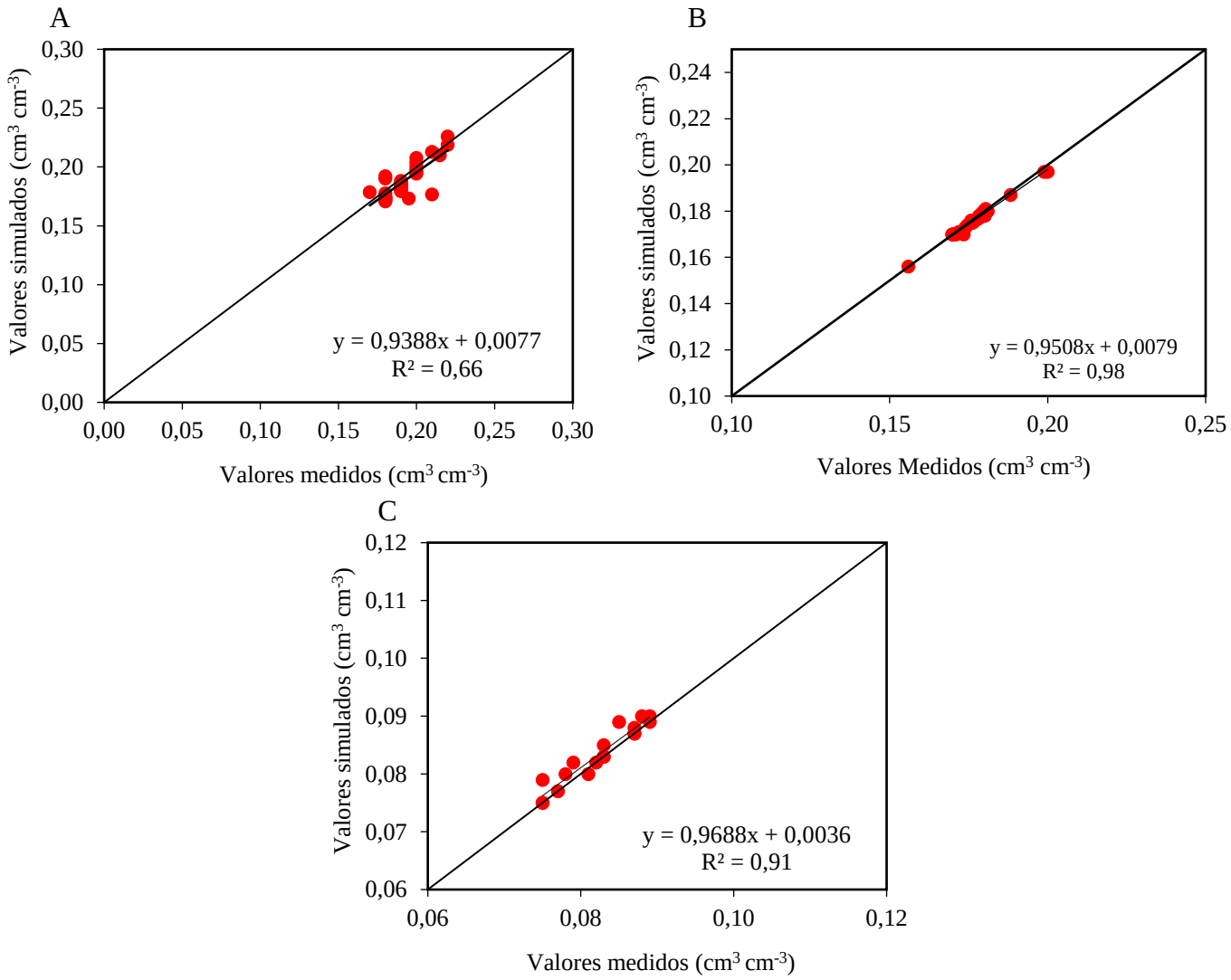
Qi et al. (2018), avaliando o modelo HYDRUS-2D na simulação da umidade de um solo cultivado com milho na China, obtiveram melhores resultados tanto para a profundidade de 10 cm como para 30 cm, considerando uma zona radicular efetiva de 40 cm.

Analisando os diferentes tipos de solo nas repectivas bacias hidrográficas (Figura 6A e 6B), pode-se verificar que o modelo simulou adequadamente a recessão da umidade do solo com cultivo de moringa, quanto no solo Argissolo Amarelo em condição de solo descoberto.

Quanto às correlações entre os valores medidos e simulados para ambas condições de solo descoberto e com cultivo de moringa analisados, observa-se nas Figuras 7A e 7B que os coeficientes de determinação (R^2) encontrados indicam que 66 e 98% dos valores simulados aproximam-se e/ ou assemelham-se aos valores medidos para as distintas condições de solo, respectivamente. Os resultados corroboram com os encontrados por Silva et al. (2015) e Qi et al. (2018), com R^2 de 0,85 e 0,92, em estudo realizado na região semiárida do Brasil, em condição de solo descoberto e o outro também em região semiárida no nordeste da China.

Na Figura 7C pode ser observado que o R^2 encontrado indica 91% dos valores simulados serem próximos dos medidos para condição de cultivo do milho em ambiente protegido.

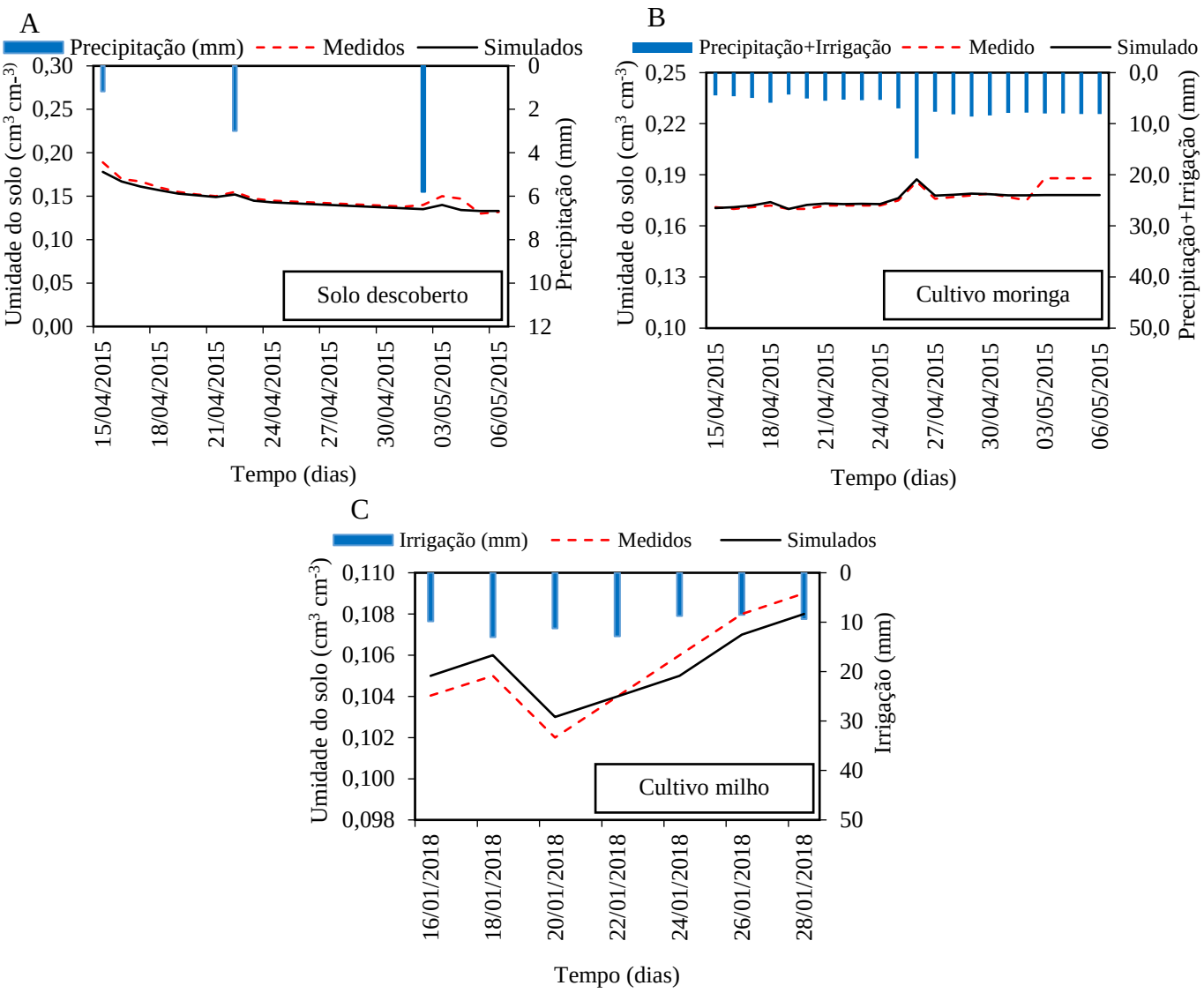
Figura 7. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados na profundidade de 20 cm; Solo descoberto (A) e Cultivo de Moringa (B) e cultivo de milho (C).



3.4 Validação e avaliação do desempenho do modelo

Observa-se nas três condições de cobertura (solo descoberto, cultivo com moringa e cultivo com milho) comportamento similar entre os valores diários medidos e simulados da umidade do solo, evidenciando que a umidade simulada acompanhou o comportamento da medida durante todos os períodos analisados, representando bem os picos de precipitação irrigação (Figura 8).

Figura 8. Comparação entre os valores de umidade medidos e simulados na profundidade de 20 cm; Solo descoberto (A) e cultivo de Moringa (B) e cultivo de Milho (C).



Os coeficientes de determinação (R^2) entre os valores medidos e simulados para os meses de abril a maio de 2015, indicam que 90 e 58% dos valores simulados aproximam-se e/ou assemelham-se aos valores medidos para condição de solo descoberto (Figura 9A) e com cultivo de moringa (Figura 9B), respectivamente. Notou-se uma pequena redução do coeficiente de 97% (mês de março a abril de 2015-calibração dos dados) para 58% (mês de abril a maio no de 2015-validação dos dados) para a condição com cultivo de moringa (Figura 9B). A redução de 40,20% pode estar está associada à taxa de interceptação e evapotranspiração, uma vez que a densidade de cobertura vegetal do solo no mês de março a

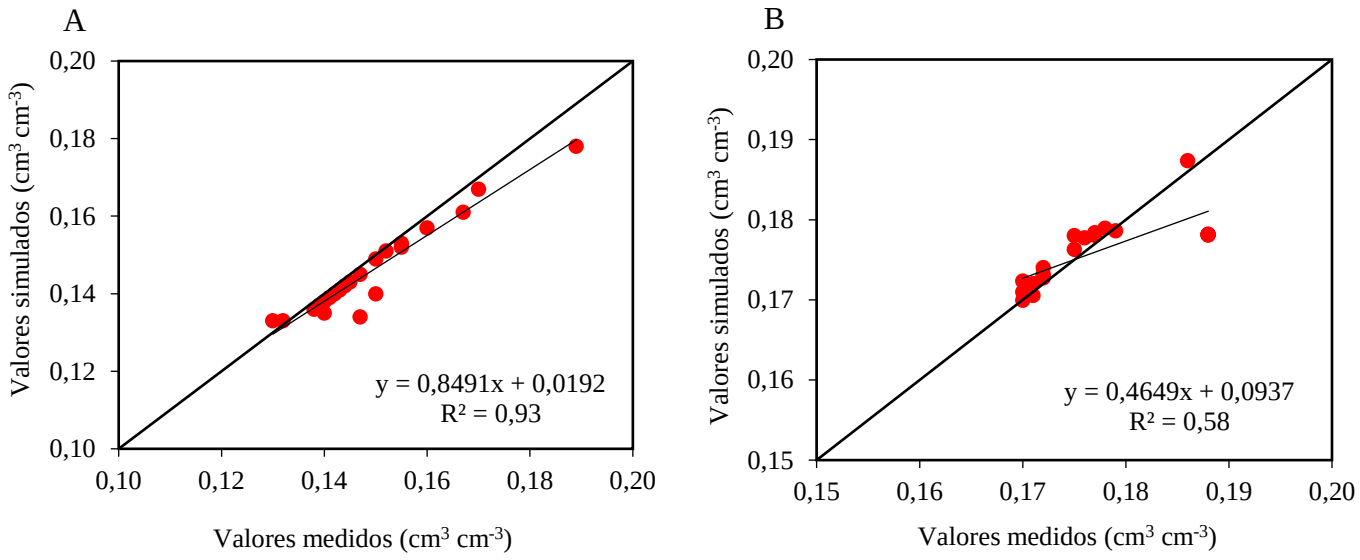
abril foi inferior ao mês de abril a maio de 2015, por conta da escassez de chuva nos referidos meses e a próprio desenvolvimento inicial da cultura da moringa.

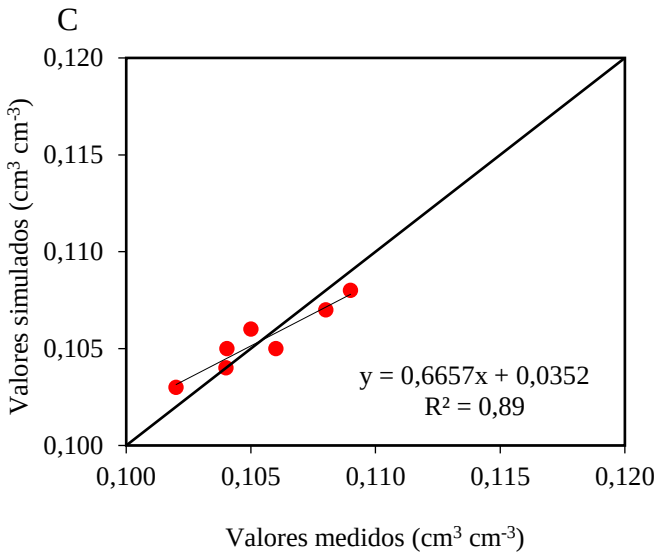
Chen, Willgoose e Saco (2014) encontraram valores de coeficiente de determinação iguais a 0,93 e 0,90 entre os valores medidos, por sensores do modelo CS616, e simulados através do Hydrus-1D para as profundidades de 30 e 90 cm, respectivamente, na Austrália.

Na Figura 9C, observa-se que no dia 18 de janeiro, a reposta do modelo para a irrigação de 13,03 mm foi de 0,106 cm^3 cm^{-3}, enquanto o valor medido foi de 0,105 cm^3 cm^{-3}. O coeficiente de determinação (R^2) apresentou redução de 91 para 89% entre a calibração e validação, representando 2,20%.

Resultados semelhantes foram encontrados por Montenegro et al. (2018) em estudo da umidade do solo, onde observaram que a dinâmica da umidade nas profundidades mais rasas é mais propensa a ser afetada por precipitação, transpiração de vegetação e evaporação do solo.

Figura 9. Correlação entre os valores de umidade medidos e simulados na profundidade de 20 cm; Solo descoberto (A) e Cultivo de Moringa (B) e Cultivo de milho (C).





A análise estatística dos valores de umidade do solo simulados pode ser observada na Tabela 5. Os baixos valores da raiz do erro quadrático médio (RMSE) e os resultados do coeficiente de concordância de Willmott (d) próximos a 1, evidenciam a boa precisão das simulações da umidade do solo pelo Hydrus-1D nas condições investigadas.

Os valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NS), que variaram de 0,82 a 0,97, classificam as simulações como “muito boa” (0,75 < NS < 1), com melhor desempenho observado no cultivo do milho em condições de ambiente protegido.

Montenegro e Ragab (2010) avaliaram e modelaram a resposta hidrológica da mesma bacia hidrográfica da área do presente estudo, localizada no semiárido brasileiro, sob diferentes usos da terra e cenários de mudanças climáticas, e encontram um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) igual a 0,73 para a vazão simulada, e um coeficiente de correlação de 0,70 para os valores simulados e observados para o índice de umidade do solo.

Zeng et al. (2014) utilizaram o Hydrus-1D para modelar a lixiviação dos sais em um solo de um distrito de irrigação da Mongólia, na China, e, avaliando a correlação entre os valores do conteúdo de água no solo simulados e medidos, encontraram resultados adequados, com o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe variando de 0,48 a 0,91. Chen, Willgoose e Saco (2014) observaram que o Hydrus-1D simulou com precisão a dinâmica da umidade do solo, com baixos valores de RMSE.

O índice de Willmot (d) apresentou valor (1,0) em que representa um ótimo desempenho do modelo. Utilizando a mesma metodologia na simulação do teor de umidade do solo, através do modelo SWAP, Ponciano (2016) afirma que houve aderência entre os dados simulados e medidos e obteve melhores resultados com (d) de 0,947. O autor relata ainda que esse resultado

satisfatório pode ser atribuído a discretização físico-hídrica do perfil do solo por camada, realizando a parametrização do sistema de equações de Van Genuchten-Mualen. Tan et al. (2014), Wang et al. (2016) e Wallor et al. (2018) também afirmam que a parametrização físico-hídrica contribui na simulação do conteúdo de água no solo, diminuindo as incertezas relacionadas a estabilidade destes parâmetros no perfil do solo.

Tabela 5. Índices de avaliação do desempenho do modelo Hydrus-1D

Ano	Tratamento	RMSE	d	NS
2015	Solo descoberto	0,00006	1,0	0,86
2015	Cultivo moringa	0,00001	1,0	0,84
2017/2018	Cultivo milho	0,000002	1,0	0,97

RMSE- Erro Quadrático Médio; d- Coeficiente de Concordância; NS- Eficiência de modelagem Nash-Sutcliff

3.4 ETr da moringa e do milho em diferentes ambientes

Após a validação do modelo, foram analisadas as evapotranspirações reais para cultura da moringa e do milho, para todo período.

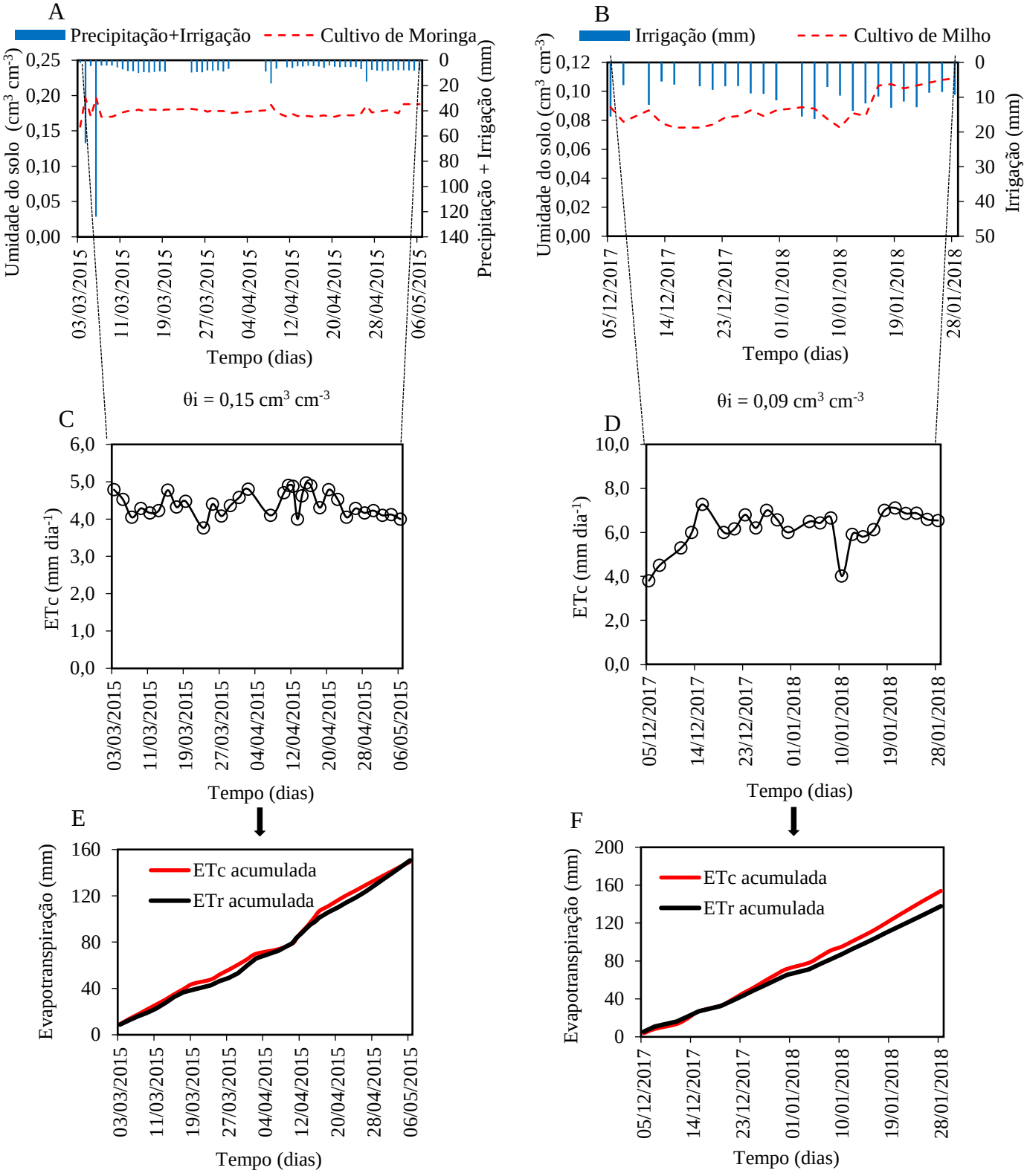
Observa-se na Figura 10A que o total precipitado foi de 208,20 mm e lâmina acumulada de 367,30 mm apresentando umidade do solo inicial de 0,15 cm^3 cm^{-3}, aumentando com os eventos da precipitação/irrigação, alcançando 0,19 cm^3 cm^{-3}. A ETc durante este período analisado para cultura da moringa (Figura 10C) variou de 3,8 a 5,0 mm dia^{-1}. Como neste período a distribuição da precipitação/irrigação foi bastante regular, não havendo restrição hídrica nas fases fenológicas da moringa, conforme os resultados acumulados da ETc e ETr de 149,52 mm e 150,65 mm (Figura 10E).

Em relação à cultura do milho na Figura 10B, observa-se uma lâmina total acumulada de 251,11 mm e umidade do solo inicial correspondente a 0,09 cm^3 cm^{-3}, chegando a 0,109 cm^3 cm^{-3} com incremento das lâminas de irrigação. Na Figura 10D é observada que a ETc variou de 3,80 a 7,27 mm dia^{-1}. Nota-se na Figura 10F que a melhor distribuição das lâminas de irrigação no solo reduziu a restrição hídrica, notadamente evidenciando pela proximidade das curvas acumuladas ETc e ETr, apresentando diferença mínima em torno de 10,48% nas últimas fases, com ETc acumulada de 153,98 e ETr 137,84 mm. Neste caso, a manutenção do conteúdo inicial de água, influenciou nos demais valores da umidade ao longo do período, evitando perdas abruptas de água em meio aos eventos de irrigação, com disponibilidade hídrica à cultura durante todo o período analisado.

Desse modo, constata-se que o modelo Hydrus-1D mostrou-se capaz de prever os cenários de déficit hídrico para a cultura da moringa e do milho, diante dos parâmetros

hidrodinâmicos do solo ajustados e dos dados de entrada da simulação. Assim, as estimativas do modelo podem ser utilizadas para auxiliar as atividades agrícolas no uso sustentável da irrigação e, portanto, otimizar irrigação e a produção de diferentes culturas diante a construção de cenários, uma vez que houve ajuste adequado do modelo e informações confiáveis da série de dados de campo utilizados na simulação.

Figura 10. Parâmetros de entrada do modelo: precipitação, umidade do solo e ETc (A, B, C, D) e comparação entre a ETc e ETr acumulada da cultura da moringa e milho (E e F).



4.0 CONCLUSÕES

A umidade do solo nas três condições de cobertura do solo apresentou os maiores valores durante o período chuvoso e maiores eventos de irrigação. No entanto, os valores não se aproximaram da saturação. A maior variabilidade da umidade do solo foi observada nos meses mais secos dos respectivos anos analisados.

O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular de forma adequada a dinâmica de umidade no solo ao longo do tempo para os diferentes tipos de solo na profundidade de 20 cm, nas respectivas condições de coberturas de solo.

As principais incertezas nas simulações com o modelo Hydrus foram observadas na parcela experimental com cultivo de moringa e milho, devido à variação dos parâmetros de transpiração dos cultivos e evaporação do solo.

A eficiência do modelo Hydrus variou de 84 a 97%, com RMSE máximo de 0,01% e concordância de 100%.

Os valores estimados de ETr foram 150,65 e 137,84 mm para moringa e milho, respectivamente.

O Hydrus-1D mostrou-se capaz de prever cenários de evapotranspiração real e identificação de períodos de déficit hídrico na simulação do ciclo da moringa e do milho.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage Paper**, 56, Rome: FAO, 297p, 1998.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. DE M. SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711–728, 2013.

ALVES, E. M. **Aplicação do programa HYDRUS1D em solo cultivado com feijão Caupi**. 2009, 83f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife.

ANTONINO, A. C. D.; SAMPAIO, E. V. S. B.; DALL'OLIO, A.; SALCEDO, E. H. Balanço hídrico em solo com cultivo de subsistência no semiárido do Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.29-34, 2000.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento – Território Mata Sul Pernambucana – Clima**. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/território-mata-sul-pernambucana/arvore.Acesso em: 12 de Junho de 2019.

CHAVES, H. M. L. Sensibilidade do modelo Hydrus aos parâmetros hidráulicos do Solo em diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, p.33- 37, v.1, n.4, 2009.

CHEN, M.; WILLGOOSE, G. R.; SACO, P. M. Spatial prediction of temporal soil moisture dynamics using HYDRUS-1D. **Hydrological Processes**, v.28, p.171-185, 2014.

DALY E.; PORPORATO, A. A review of soil moisture dynamics: from rainfall infiltration to ecosystem response. **Environmental Engineering Science**, v.22, n.1, p.9–24, 2005.

FEDDES, R. A., KOWALIK, P., KOLINSKA-MALINKA, K., & ZARADNY, H. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. **Journal of Hydrology**, v.31, n.1-2, p.13-26, 1976.

FEDDES, R.A.; KOWALIK, P.J.; ZARADNY, H. **Simulation of field water use and crop yield.** Wageningen: Pudoc, 1978, 189p. (Simulation Monographs).

IZÍDIO, N. S. C.; PALÁCIO, H. A. Q.; ANDRADE, E. M. DE; ARAÚJO NETO, J. R.; BATISTA, A. A. Interceptação da chuva pela vegetação da caatinga em microbacia no semiárido cearense. **Revista Agro@mbiente**, v.7, n.1, p.44-52, 2013.

MONTEIRO, A. L. N.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, F. X. DOS. Avaliação de lavagem parcial de sais em Neossolo Flúvico irrigado, utilizando modelagem computacional. **Revista de Engenharia Agrícola**, v.1, n.13, p.207-220, 2009.

MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. DOS.; SOUZA, S. E. R. DE.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Temporal dynamics of soil moisture and rainfall erosivity in a tropical volcanic archipelago. **Journal of Hydrology**, v.563, p.737-749, 2018.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, v.1, n.13, p.2705-2723, 2010.

MUALEM. Y. A new model for predicting lhe hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, v.1, n.9, p.513-522, 1976.

PEAKE, A. S.; HUTH, N. I.; KELLY, A. M.; BELL, K. L. Field Crops Research Variation in water extraction with maize plant density and its impact on model application. **Field Crops Research**, v.146, p.31–37, 2013.

PHOGAT, V.; PITT, T.; COX, J. W.; Š, J.; SKEWES, M. A. Soil water and salinity dynamics under sprinkler irrigated almond exposed to a varied salinity stress at different growth stages. **Agricultural Water Management**, v.201, p.70-82, 2018.

PONCIANO, I. M. **Simulação da extração da solução do solo pela cultura do milho utilizando modelo SWAP**. 2016. 103 f. Tese (Doutorado em Ciências) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

QI, Z.; FENG, H.; ZHAO, Y.; ZHANG, T.; YANG, A.; ZHANG, Z. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, northwest China. **Agricultural Water Management**, v.201, p.219–231, 2018.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações.** São Paulo: Editora Manole, 2004. 478 p.

SANTOS, C. S. **REÚSO de água na cultura do milho em solos representativos da bacia do rio Ipojuca**. 2019. 200f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SANTOS, C. S. **Conservação de solo e água em unidade de REÚSO do semiárido para proteção ambiental, produção agrícola e inclusão social**. 2015. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

SANTOS, T. E. M. DOS; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.7, p.670-679, 2011.

SANTOS, M. A. **Extração de água do solo por plantas de soja: modelagem hidrofísica e empírica**. 2011. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciências). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", ESALQ/USP, Piracicaba.

SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A. Erosividade e padrões hidrológicos de precipitação no Agreste Central pernambucano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.871–880, 2012.

SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTEIRO, A. L. N.; SILVA JUNIOR, V. P. Modelagem da dinâmica de umidade do solo em diferentes condições de cobertura no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, n.10, p.293-303, 2015.

SILVA, A. P. N. DA; MONTENEGRO, A. A. A.; MOURA, G. B. A.; SILVA, J. J. N.; SOUZA, L. R. DE. Chuva mensal provável para o Agreste de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.1, n.9, p.287-296, 2013.

SILVA, J. R. L. DA; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, T. E. M. DOS. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista". **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.1, n.9, p.27-36, 2012.

SILVA, A. O.; SILVA, E. F. F.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para região norte de Recife-PE. **Engenharia na agricultura**, v.20, n.2, p.163-174, 2012b.

ŠIMŮNEK, J.; HOPMANS, J. W. Modeling compensated root water and nutrient uptake. **Ecological Modeling**, v.220, n.4, p.505-521, 2009.

ŠIMŮNEK, J.; ŠEJNA, M.; SAITO, M. H.; SAKAI, M.; VAN GENUCHTEN, M. T. **The HYDRUS-1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water,**

heat, and multiple solutes in variably-saturated Media. Version 4.0. Riverside, USA: University of California, Department of Environmental Sciences, 2009, 332p.

SOARES, W. A. **Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste do Brasil**. 2009, 136f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares). Universidade Federal de Pernambuco, UFPE, Recife.

SHAO, W.; COENDERS-GERRITS, M.; JUDGE, J.; ZENG, Y.; SU, Y. The impact of non-isothermal soil moisture transport on evaporation fluxes in a maize cropland. **Journal of Hydrology**, v.561, p.833-847, 2018.

TAN, X.; SHAO, D.; LIU, H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D. **Agricultural Water Management**, v.132, p.69–78, 2014.

TYAGI, J. V.; RAKESH KUMAR; SRIVASTAVA, S. L.; SINGH, R. D. Effect of micro-environmental factors on natural regeneration of Sal (*Shorea robusta*). **Journal of Forestry Research**, v.22, n.4, p.543-550, 2011.

VANCLOOSTER, M.; VIANE, P.; DIELS, J.; CHRISTIAENS, K. WAVE: A mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment. **Reference and User's Manual (release 2.0).** Louvain-la-Neuve: Universite Catholique de Louvain; Institute for Land and Water Management, 1994. 145p.

VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-from equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 1, n.6, p.892-898,1998.

VILLA-NOVA, N. A.; OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: **Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos**, Fortaleza. Anais... Fortaleza: SBRH, 1981. p.281-299.

WALLOR, E.; ROSSKOPF, N.; ZEITZ, J. Geoderma Hydraulic properties of drained and cultivated fen soils part I - Horizon- based evaluation of van Genuchten parameters considering the state of moorsh-forming process. **Geoderma**, v.313, n.1, p. 69–81, 2018.

ZENG, W.; XU, C.; WU, J.; HUANG, J. Soil salt leaching under different irrigation regimes: HYDRUS-1D modelling and analysis. **Journal of Arid Land**, v.6, n.1, p.44-58, 2014.

CAPÍTULO IV

Estado nutricional e produção de biomassa do milho forrageiro irrigado com água residuária em solos representativos da bacia do rio Ipojuca-PE

ESTADO NUTRICIONAL E PRODUÇÃO DE BIOMASSA DO MILHO FORRAGEIRO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA EM SOLOS REPRESENTATIVOS DA BACIA DO RIO IPOJUCA-PE

RESUMO

A aplicação de água residuária em cultivos agrícolas como fonte de nutrientes é uma alternativa viável devido à alta concentração de nutrientes. Nesta perspectiva, objetivou-se com este trabalho avaliar o estado nutricional e produção de biomassa na cultura do milho, irrigado com água residuária em diferentes solos da bacia do rio Ipojuca-PE. O experimento foi conduzido em ambiente protegido da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE de dezembro de 2018 a fevereiro de 2019. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com esquema fatorial (5x2) +2, correspondente a 05 lâminas de irrigação (80, 90, 100, 110 e 120% da ETc) e 02 tipos de solos (Planossolo Háplico – Solo 1; Neossolo Regolítico – Solo 2), mais 02 testemunhas absolutas irrigadas com água de abastecimento, com 4 repetições. Ao final do ciclo, foram coletadas as plantas e determinados os teores e acúmulos de N, P, K, Ca, Mg, S e Na na folha e caule. Quanto à produção de biomassa foram avaliadas: massa fresca foliar (MFF), massa seca foliar (MSF), massa fresca caulinar (MFC), massa seca caulinar (MSC), massa seca total (MST), peso das espigas com palha (PECP) e peso de espigas sem palha (PESP). O estado nutricional do milho foi influenciado pelo tipo de água de irrigação, apresentando melhor equilíbrio nutricional quando foi irrigado com água residuária. O Neossolo Regolítico contribuiu para maiores teores de macronutrientes que o Planossolo Háplico, havendo uma correspondência na capacidade dos nutrientes. O acúmulo de nutrientes pela cultura do milho em ambos os tipos de solos decresceu na seguinte ordem: K > N > Ca > Mg > P > S; K > N > P > Ca > S > Mg para folha e caule, respectivamente, para uma produtividade de espiga com palha de 25,18 t ha^{-1} e matéria seca total de 5,85 t ha^{-1}. A cultivar BR 5026 apresenta-se sensível à restrição hídrica para fins de produção de silagem, sendo os maiores rendimentos dos componentes de produção alcançados a partir de lâminas de 100% e 120% da evapotranspiração da cultura.

Palavras-chave: *Zea mays* L., nutrição de plantas, REÚSO de água.

NUTRITIONAL STATUS AND BIOMASS PRODUCTION OF IRRIGATED FORAGE MAIZE WITH RESIDUE WATER IN REPRESENTATIVE SOILS OF THE IPOJUCA-PE RIVER BASIN

ABSTRACT

The application of wastewater to agricultural crops as a source of nutrients is a feasible alternative because of the high concentration of nutrients. In this perspective, the objective of this work was to evaluate the nutritional status and biomass production in the maize crop, irrigated with wastewater in different soils of the Ipojuca-PE basin. The experiment was conducted in a protected environment of the Federal Rural University of Pernambuco-UFRPE. The experimental design was a randomized block design, with a factorial scheme (5x2) +2, corresponding to 05 irrigation depths (80, 90, 100, 110 and 120% ETc) and 02 soil types (Haplic Planosol - Soil 1 and Entisol - Soil 2), plus 02 absolute controls irrigated with fresh water with 4 replicates. At the end of the cycle, the plants were collected and the contents and accumulations of N, P, K, Ca, Mg, S and Na of leaf and stem were determined. Regarding to biomass production, fresh leaf mass (DMF), leaf dry mass (DMF), fresh dry mass (DMF), dry mass (DMW), total dry mass (MST), weight of ears with straw (PECP) and weight of ears without straw (PESP). The nutritional status of maize was influenced by the type of irrigation water, presenting better nutritional balance when irrigated with wastewater. Entisol contributed to higher macronutrient contents than the Haplic Planosol, with a correspondence in nutrient capacity. The accumulation of nutrients by corn crop in both types of soils decreased in the following order: K> N> Ca> Mg> P> S; K> N> P> Ca> S> Mg for leaf and stem, respectively, for yield of spike with straw of 25.18 t ha^{-1} and total dry matter of 5.85 t ha^{-1}. The cultivar BR 5026 is sensitive to water restriction for silage production purposes, with the highest yields of the production components obtained from 100% and 120% of the crop evapotranspiration.

Key words: *Zea mays* L., plant nutrition, water reuse.

1.0 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) pertencente à família Poacea, representa um dos principais cereais cultivados em todo o mundo, fornecendo produtos largamente utilizados para a alimentação humana, animal e matéria-prima para indústria, principalmente em função da quantidade e da natureza das reservas energéticas acumuladas nos grãos (Weiland, 2006; Schittenhelm, 2008).

O Brasil é o terceiro produtor mundial de milho, perdendo apenas para Estados Unidos e China, atingindo sua maior produção estimada em 94 milhões de toneladas na safra (2018/2019) sendo uma área plantada de 17,25 milhões de ha. Pernambuco se destaca na região nordeste como sexto produtor de milho, sendo cultivado em quase todas as microrregiões do Estado por pequenos e médios produtores, tanto para produção de grão quanto para silagem, registrando uma produção de 130 mil toneladas e área planta na safra (2018/2019) aproximado de 217,9 mil ha (CONAB, 2018).

O desenvolvimento gerado pelo homem tem desfeito o conceito de que a disponibilidade hídrica é abundante e ilimitada, o que tem levado as questões sobre qualidade e economia da água, a se tornarem cada vez mais importantes no contexto da gestão ambiental e da engenharia de irrigação (Santos et al., 2012).

O aumento do consumo de água e de alimentos no mundo tem sido impulsionado pelo aumento do padrão de consumo e pelo crescimento das diversas atividades humanas que através das diversas formas de poluição, afetam a disponibilidade de água potável, tornando-a cada vez mais escassa, o que faz do reúso de água uma alternativa bastante atrativa na área sobretudo agrícola, o que tem estimulado a realização de diversas pesquisas por todo o mundo (Rutkowski et al., 2007; Walker e Lin, 2008; Qadir et al., 2010; Santos et al., 2017).

A produção de culturas com água residuária tem se mostrado uma alternativa sustentável de modo social, econômico e ambiental, pois em sua constituição traz grande aporte de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo. Portanto, o uso de esgoto doméstico tratado se assemelha ao uso de uma solução nutritiva. Este fato, associado ao poder de lixiviação de nutrientes no solo, são fatores importantes a considerar na aplicação parcelada de fertilizantes para a cultura sob irrigação (Costa et al., 2012).

Para a obtenção de produtividades elevadas, o milho necessita ter suas exigências nutricionais plenamente satisfeitas de forma a atender à grande extração de nutrientes (Cantarella e Duarte, 2004).

No que diz respeito à irrigação, o monitoramento do requerimento de água e do estresse hídrico das culturas é importante para programar a irrigação, e implica em parâmetros ligados à eficiência do uso da água, e na absorção de nutrientes pelas plantas, promovendo incrementos na produção das culturas (Ferreira et al., 2015).

A deficiência hídrica exerce influência negativa sobre as plantas e, na maioria dos casos, seus danos são mensurados mediante o acompanhamento dos processos que estão relacionados

ao crescimento, como as alterações que ocorrem a nível morfológico e no acúmulo de biomassa, por parte dos distintos órgãos vegetais (Silva et al., 2012).

O conhecimento das necessidades nutricionais das plantas e as possíveis relações com manejo adequado da irrigação é de fundamental importância para subsidiar estratégias de manejo da cultura. Estudos sobre o comportamento produtivo e a quantidade de nutrientes acumulados na planta, fornece informações imprescindíveis para conhecimento das exigências nutricionais e posteriormente essas informações que podem servir como subsídio para estimativa da quantidade de nutrientes a ser fornecida às plantas por meio da adubação (Laviola e Dais, 2008; Grangeiro et al., 2011).

Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar o estado nutricional e produção de biomassa na cultura do milho, irrigado com água residuária em diferentes solos da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

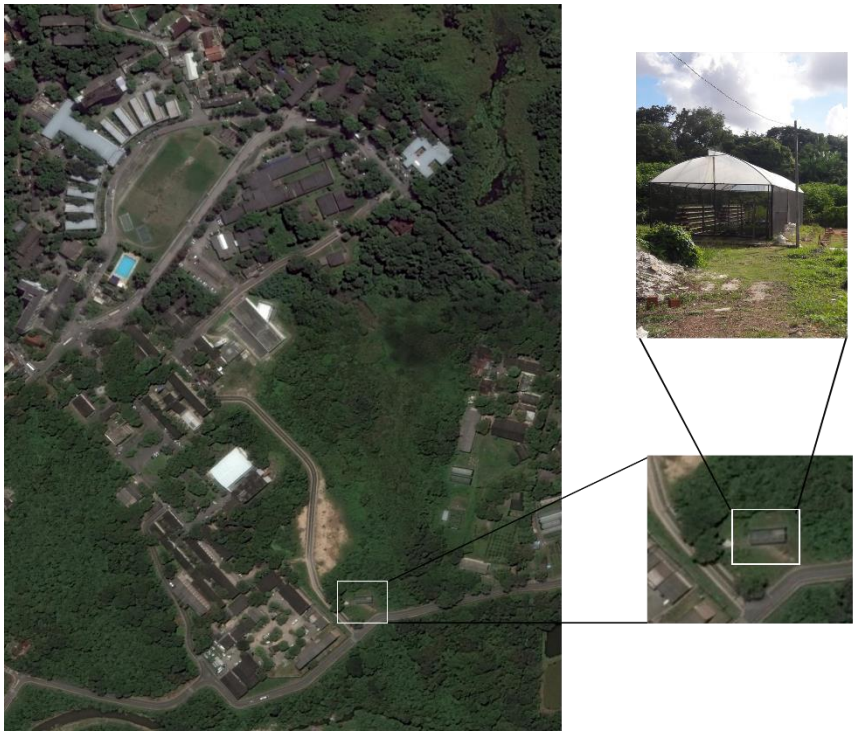
2.0 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do ambiente experimental

O experimento foi desenvolvido em condições de casa de vegetação da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Campus Recife, sob as seguintes coordenadas geográficas: 08º 01’ 07’’ S e 34º 56’ 53’’ W, e altitude de 6,5 m, de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum) (Figura 1), durante os meses de Dezembro de 2018 a Fevereiro de 2019, com a cultura do milho até os 80 dias após a semeadura (DAS).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média é de 2.263,5 mm ano^{-1} concentrada, principalmente, entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 377,9 mm no mês de mais chuvoso (junho); as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média 79,8%, insolação 2550,7 horas. O total de evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 e 1.600 mm ano^{-1} (Barros, 2019; INMET, 2019).

Figura 1. Localização da casa de vegetação-UFRPE.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 Caracterização experimental

A área experimental foi composta por 48 vasos plásticos com capacidade de 60 L, diâmetro externo na borda superior 0,40 m e altura externa de 0,55 m.

Para preenchimento interno dos vasos foi colocada uma camada de 2 cm de brita nº1 em cada vaso, a fim de encobrir o dreno e facilitar a drenagem. Após o preenchimento com brita foi colocado sobre a mesma, manta geotêxtil, com finalidade de filtro para evitar a passagem de partículas de solo para a camada inferior. Após a colocação da manta geotêxtil os sistemas foram preenchidos com 64 kg de solo seco (Planossolo Háplico – Solo 1); 67,21 kg de solo seco (Neossolo Regolítico – Solo 2), por fim sendo alocado em tijolos afim de nivelar a área experimental.

O sistema de drenagem teve na parte inferior de cada vaso um conector de 16 mm adaptado a uma mangueira plástica transparente, direcionando o efluente drenado a uma garrafa PET de 2,0 L, para coleta da solução drenada.

Os solos que foram utilizados são representativos da Bacia do Rio Ipojuca-PE e seus atributos físico-químicos estão dispostos nas Tabelas 1 e 2 (Embrapa, 2017).

Tabela 1. Características físico-químicas do solo 1 (Planossolo Háplico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
Solo 1	g Kg^{-1}				g cm^{-3}		%	%		
	711	117	56	116	1,43	2,69	46,84	9,6	4,58	Areia Franca

pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}						%	mg Kg^{-1}	g kg^{-1}	
7	1,39	2,3	1,6	0	0	0,52	0,49	10,59	109	8,5	4,14

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

Tabela 2. Características físico-químicas do solo 2 (Neossolo Regolítico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
Solo 2	g Kg^{-1}				g cm^{-3}		%	%		
	700	117	47	76	1,60	2,52	51,2	8,3	4,3	Areia Franca

pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}						%	mg Kg^{-1}	g kg^{-1}	
7	0,54	1,1	1,0	0	0	0,38	0,26	13,86	9	0,9	1,55

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial (5 x 2) + 2, com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais.

Os tratamentos consistiram em cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (ETc): (80, 90, 100, 110 e 120%) do esgoto doméstico tratado proveniente de Mutuca, distrito do município de Pesqueira-PE, 02 tipos de solos (Planossolo Háplico – Solo 1; Neossolo Regolítico – Solo 2; mais 02 testemunhas. As testemunhas consistiram da irrigação com água de abastecimento com lâmina correspondente a 100% da ETc para o solo 1 e 2. A água de abastecimento foi proveniente de Poço do CEGOE/UFRPE.

2.4 Dimensionamento das águas utilizadas e manejo de irrigação

O efluente líquido tratado foi proveniente da Estação de Tratamento de Reúso e Manejo Hidroagrícola, localizada no Distrito de Mutuca pertencente à cidade de Pesqueira-PE. Para a coleta da água residuária foi utilizado uma tubulação de PVC, oriunda diretamente da lagoa de polimento e com utilização de uma Motobomba Schneider BC-92, de 1,5 CV. Essa tubulação de recalque encaminhou o efluente até o reservatório com capacidade de 1000 litros, onde foi acondicionado.

O efluente foi armazenado em uma caixa de água de 3000 L. Para o tratamento testemunha foi utilizado um reservatório de 100 L com água de abastecimento local proveniente de poço do CEGOE/UFRPE.

A determinação da composição físico-química da água residuária e água de abastecimento (Tabela 3) foi realizada pela Agrolab Análises Ambientais e na Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA, respectivamente. Os parâmetros físicos-químicos foram determinados de acordo com a metodologia proposta por APHA (1995).

Tabela 3. Caracterização físico-química da água de abastecimento e da água residuária utilizado no experimento.

Constituintes	Unidade	AB	AR
pH		6,30	8,30
CE	dS m^{-1}	0,13	5,70
STD	µS cm^{-1}	-	2869,0
N-Total	mg L^{-1}	-	23,6
P -Total	mg L^{-1}	-	2,0
K^{+}	mg L^{-1}	2,50	85,8
Ca^{2+}	mg L^{-1}	0,90	34,5
Mg^{2+}	mg L^{-1}	0,60	50,9
Na^{+}	mg L^{-1}	5,40	782,0
Nitrato	mg L^{-1}	0,02	42,4
Cloretos	mg L^{-1}	15,40	950,0
Sulfato	mg L^{-1}	-	103,7
Bicarbonato	mg L^{-1}	-	647,2

O critério adotado na definição das lâminas de irrigação com efluente doméstico tratado (aplicadas manualmente) na implantação dos tratamentos baseou-se no sistema de drenagem dos tratamentos com 100% da ETc (Equação 1). A frequência da aplicação do efluente doméstico foi com turno de rega a cada dois dias.

$$I = (La - Ld) + 10\% \quad (1)$$

Em que: I – Irrigação aplicada (L); La – lâmina aplicada (L); Ld – lâmina drenada (L).

A lâmina foi aplicada com base no consumo diário (La-Ld) observado, somado a 10% deste, garantindo a drenagem. A esta lâmina foi somada ao percentual de lâmina de irrigação correspondente a cada tratamento em ambos os tipos de solos.

Para o critério da lâmina de irrigação nas plantas irrigadas com água de abastecimento (Testemunhas) baseou-se na evapotranspiração da cultura, onde foram distribuídos três vasos preenchidos com solo 1 – Planossolo Háplico e três vasos preenchidos com solo 2 – Neossolo Regolítico, totalizando seis vasos (lisímetros) adicionais entre os demais. Todos também semeados com milho, cv. BR 5026 IPA no mesmo dia dos demais. Assim, os solos foram colocados na capacidade de campo, evitando variação na água drenada e, em seguida, foi estimada diariamente a evapotranspiração da cultura (ETc), conforme Aboukhaled et al. (1982) (Equação 2):

$$ET_C = P + I - D/A \qquad (2)$$

Em que: ETc - Evapotranspiração da cultura (mm); P - Precipitação pluviométrica (mm); I - Lâmina de água aplica por irrigação (mm); D - Água drenada do lisímetro (mm). Considerando a precipitação igual a zero por ser cultivo em ambiente protegido.

2.5 Descrição e implementação das culturas

A semeadura do milho foi realizada manualmente a 5 cm de profundidade, usando-se 5 sementes/vaso, logo após foi realizado o desbaste, restando apenas 1 planta/vaso. Utilizou-se a cultivar BR 5026 do IPA (São José). A cultivar foi semeada no espaçamento de 0,7 m entre linhas e 0,30 m entre plantas.

Para suprir as necessidades nutricionais da cultura foi realizada adubação segundo o Manual de Recomendação de Adubação do Instituto Agronômico de Pernambuco (Cavalcanti et al., 2008). A adubação mineral convencional consistiu em 90 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 20 kg ha^{-1} de K_2O. O nitrogênio foi parcelado, com a aplicação de 30 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia, por ocasião da emergência, e o restante (60 kg ha^{-1}) com 40 dias após a semeadura (DAS).

2.6 Determinação dos componentes de produção

A colheita foi realizada aos 80 dias após a semeadura (DAS), os componentes de produção por parcela útil foram determinados mediante: massa fresca foliar (MFF), massa seca foliar (MSF), massa fresca caulinar (MFC), massa seca caulinar (MSC), massa seca total (MST), peso das espigas com palha (PECP) e peso de espigas sem palha (PESP). As pesagens foram realizadas em balança digital com capacidade para 15 kg.

2.7 Determinação de Na e macronutrientes

Com ocasião da colheita realizou-se a análise nutricional. As plantas foram cortadas rente ao solo, fracionadas em folhas e caule, sendo acondicionadas em sacos de papel e colocadas, posteriormente, em estufa com circulação forçada de ar à temperatura de 65ºC, até atingir massa constante. As amostras foram processadas em moinho tipo Willey e acondicionadas em recipientes fechados.

Para determinação dos teores de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), enxofre (S) e Sódio (Na) foram realizadas digestões nitro-perclóricas e para a determinação do nitrogênio (N) a digestão sulfúrica, pelo destilador de Kjeldahl (Bezerra Neto e Barreto, 2011). Os teores de K e Na foram determinados pelo fotometro de chama; os teores de P e S obtidos por espectrofotometria; o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Para a determinação do acúmulo de nutrientes, multiplicou-se os teores dos nutrientes pela massa seca correspondente a cada órgão da planta.

2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F utilizando-se o software estatístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2011), com nível de significância de 0,05 de probabilidade para o teste de média, regressão e contraste dos dados.

Os contrastes ortogonais foram realizados com as testemunhas *vs* água residuária que corresponde: 100% de água de abastecimento *vs* 100% de água residuária, nos dois solos analisados.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Teor de Nutrientes

Observou-se efeito significativo do fator isolado lâminas de reposição da ETc para todos os nutrientes analisados na folha do milho, com exceção do Ca, Mg e S ($p<0,01$) e ($p<0,05$). Para o fator isolado tipos de solos, verificou-se que houve efeito significativo apenas para N e Mg ($p<0,01$) e ($p<0,05$). Na análise de variância para caule, observou-se efeito significativo do fator lâmina de reposição da ETc apenas para N, Ca e Mg ($p<0,01$) e ($p<0,05$). Para fator solo, houve efeito significativo apenas para K ($p<0,01$) (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da ANOVA para os teores de nutrientes na folha e caule de plantas de milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos.

		Quadrado Médio						
		Folha						
Fontes de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
Lâminas (L)	4	29,44**	1,46**	496,19*	17,08^{ns}	2,57^{ns}	0,030^{ns}	9,79*
Solos (S)	1	72,63**	0,22^{ns}	1,10^{ns}	8,74^{ns}	19,78*	0,008^{ns}	8,18^{ns}
Lx S	4	5,95^{ns}	0,12^{ns}	393,12^{ns}	3,28^{ns}	2,21^{ns}	0,110^{ns}	32,12^{ns}
Bloco	3	1,25^{ns}	5,53^{ns}	144,83^{ns}	5,34^{ns}	8,80^{ns}	0,653**	0,38^{ns}
Resíduo	27							
CV	%	17,59	23,94	26,26	29,45	24,42	17,97	43,25
		Caule						
Fontes de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
Lâminas (L)	4	19,57**	0,39^{ns}	1,34^{ns}	0,54*	0,39**	0,08^{ns}	1,80^{ns}
Solos (S)	1	0,01^{ns}	0,55^{ns}	29,94**	0,10^{ns}	0,0003^{ns}	0,02^{ns}	0,06^{ns}
Lx S	4	1,81^{ns}	0,32^{ns}	2,74^{ns}	0,10^{ns}	0,017^{ns}	0,01^{ns}	1,36^{ns}
Bloco	3	0,72^{ns}	0,56^{ns}	1,75^{ns}	4,36**	0,12^{ns}	0,64**	0,59^{ns}
Resíduo	27							
CV	%	15,43	13,77	17,72	30,17	15,30	13,02	24,35

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns}Não significativo, pelo teste F.

A análise de regressão aplicada aos dados evidenciou que os teores de nitrogênio apresentaram efeito quadrático em função das lâminas de reposição da ETc aplicadas (Figura 2A). Constatou-se diferença significativa entre as lâminas, obtendo-se um teor máximo estimado de 13,64 g kg^{-1} de N na lâmina de 112,26% da ETc, revelando um incremento percentual de 42,38% sobre a lâmina de 80% da ETc.

Segundo Bezerra Neto e Barreto (2011), a faixa adequada de N na folha do milho se situa entre 27,5-35,2 g kg^{-1}. Neste experimento foi verificado uma variação de 9,58 a 13,64 g kg^{-1} de N. Essa menor concentração de N ao final do ciclo é justificada pela grande mobilidade do N que se transferiu para os órgãos de propagação (espiga), como, também, devido à senescência, grande parte da folhagem do material vegetal já ter caído.

Sant'Ana et al. (2010) ressalvam que o N é um elemento que se perde facilmente por lixiviação, volatilização e desnitrificação, no sistema solo-planta, e o manejo adequado da adubação nitrogenada é tido como um dos mais difíceis.

Prior et al. (2015), em estudo nutricional do milho ao final do ciclo, aplicando água residuária de suinocultura, encontraram valores de N entre 13,00 a 22,66 g kg^{-1}, ficando também abaixo do limite considerado adequado. Meneghetti et al. (2012), analisando o teor nutricional

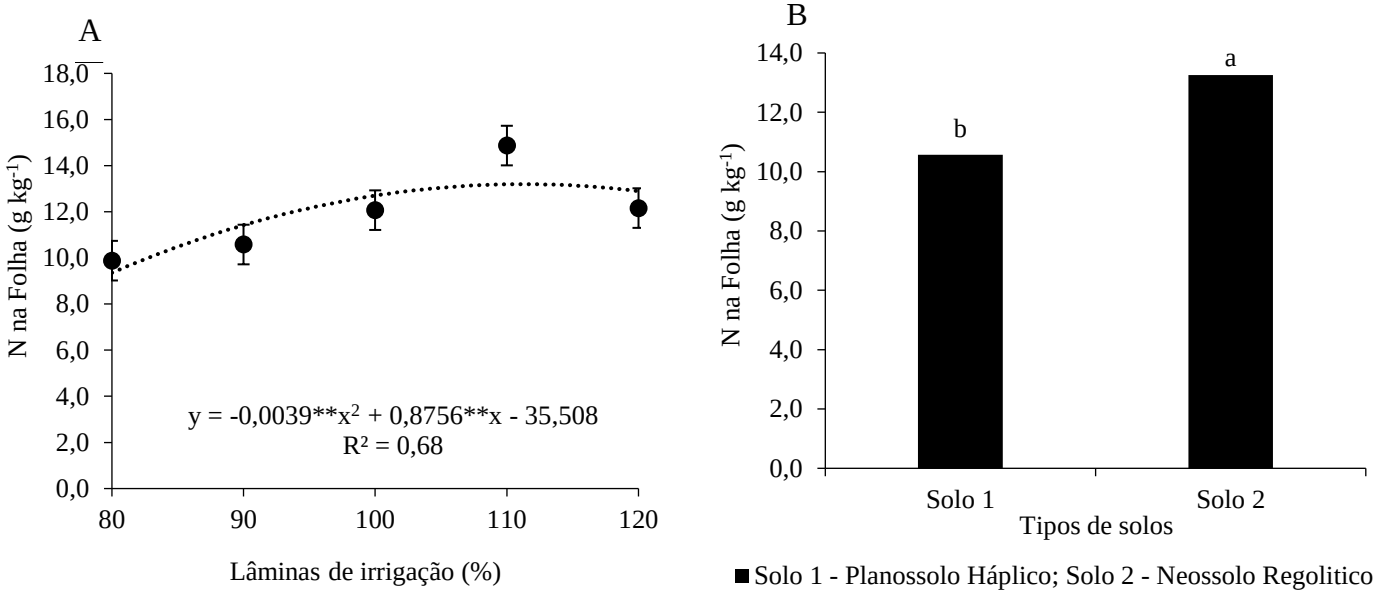
do milho sobre irrigação de água residuária de suinocultura, também encontraram teores de N abaixo do limite adequado para cultura, com valor médio de 16,23 g kg^{-1}.

O teor de nitrogênio (N) obtido na folha do milho em Neossolo Regolítico foi de 13,26 g kg^{-1}. Já para o Planossolo Háplico, o teor médio encontrado foi de 10,57 g kg^{-1}, observando-se um incremento de 25,44% na concentração de N (Figura 2B).

Ressalta-se que o Planossolo Háplico já vem recebendo água residuária há mais de 10 anos, o que conduz a altos teores de nutrientes nesse solo, podendo contribuir para o desequilíbrio na absorção pela planta. Além disso, é um solo com maiores concentrações de Na^+ em relação ao Neossolo Regolítico. Segundo Erthal et al. (2010), altas concentrações de Na^+ na solução do solo em comparação com o Ca^{2+} e o Mg^{2+}, podem causar deterioração da estrutura do solo, pela dispersão dos colóides e subsequente entupimento dos macroporos, causando decréscimo na permeabilidade e porosidade, dificultando na absorção dos nutrientes pelas plantas.

Araújo et al. (2011), analisando a absorção de espécies forrageiras em três solos representativos da região semiárida, constataram que o Neossolo Regolítico apresentou maior produção de biomassa. No Neossolo Regolítico, os incrementos foram de duas a quatro vezes, enquanto que no Planossolo Háplico foram, no máximo, de duas vezes.

Figura 2. Teores de nitrogênio na folha do milho em função das lâminas de reposição da ETc (A) e tipos de solos (B), Recife, 2019. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



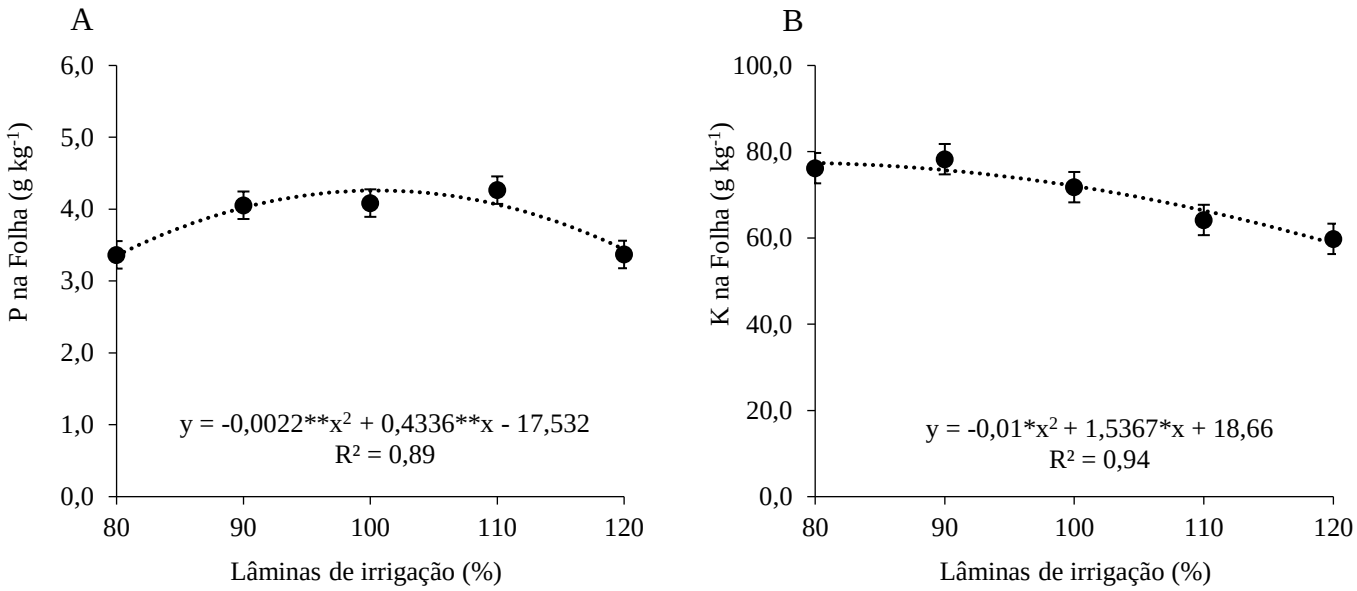
Para o teor de fósforo (P) na folha do milho em função das lâminas de reposição da ETc, ajustou-se o modelo quadrático (Figura 3A). O máximo teor de P estimado para a cultura do milho foi de 3,83 g kg^{-1} na lâmina de 98,54% da ETc, revelando incremento de 24,51% sobre a lâmina de 80% da ETc.

Os teores de P das folhas variaram de 3,08 a 3,83 g kg^{-1}, sendo o máximo estimado na lâmina de 98,54% da ETc, que encontra-se acima daqueles considerados adequados para a cultura do milho (2,5 a 3,5 g kg^{-1}), dando a conotação de consumo de luxo pelas plantas, pois estão acima da faixa indicada para uma nutrição adequada. Costa et al. (2012), ao determinarem a concentração de N em milho irrigado com água residuária, obtiveram um valor médio de 2,69 g kg^{-1}. Já Gondim et al. (2016) encontraram teores de P parte aérea de milho variando entre 5,9 a 9,9 g kg^{-1}, indicando consumo de luxo.

Em relação ao teor de potássio (K) na folha de milho, observou-se efeito quadrático em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 3B), revelando-se um teor máximo estimado de 77,70 g kg^{-1} de K na lâmina de 76,84% da ETc, obtendo-se um decréscimo percentual de 0,14% sobre a lâmina de 80% da ETc. Os teores de K na folha, variaram de 77,58 a 77,70 g kg^{-1}, resultados próximos aos encontrados por Gondim et al. (2016), que variaram de 49,0 a 83,3 g kg^{-1} também analisando parte aérea do milho. Com base em tais resultados, é possível inferir que o uso de água residuária proporciona a maiores teores de K na folha.

A redução dos teores de potássio encontrados com aumento das lâminas de irrigação aplicadas evidencia que o excesso de água no solo proporciona reduções consideráveis nas quantidades deste nutriente nas folhas do milho. Neste sentido, Teixeira et al. (2011) ressaltam que a sua disponibilidade é determinada pelas condições de difusão e de fluxo de massa no solo que, por sua vez, são funções do seu conteúdo de água, e da lixiviação, que ocorre em função do teor desse nutriente na solução do solo e da lâmina aplicada (Vilela et al., 2004). Assim, a redução da disponibilidade de K próximo à zona de absorção da cultura ocorreu em resposta às maiores lâminas de irrigação aplicadas.

Figura 3. Teores de fósforo (A) e potássio (B) na folha do milho em função das lâminas de reposição da ETc, Recife, 2019.



Ao analisar o efeito isolado solos (Figura 4A), verificou-se que o teor de magnésio (Mg) obtido na folha do milho foi de 8,74 g kg^{-1} no Neossolo Regolítico, enquanto que para o Planossolo Háplico foi de 7,33 g kg^{-1}, observando-se um incremento de 19,24% na concentração de Mg.

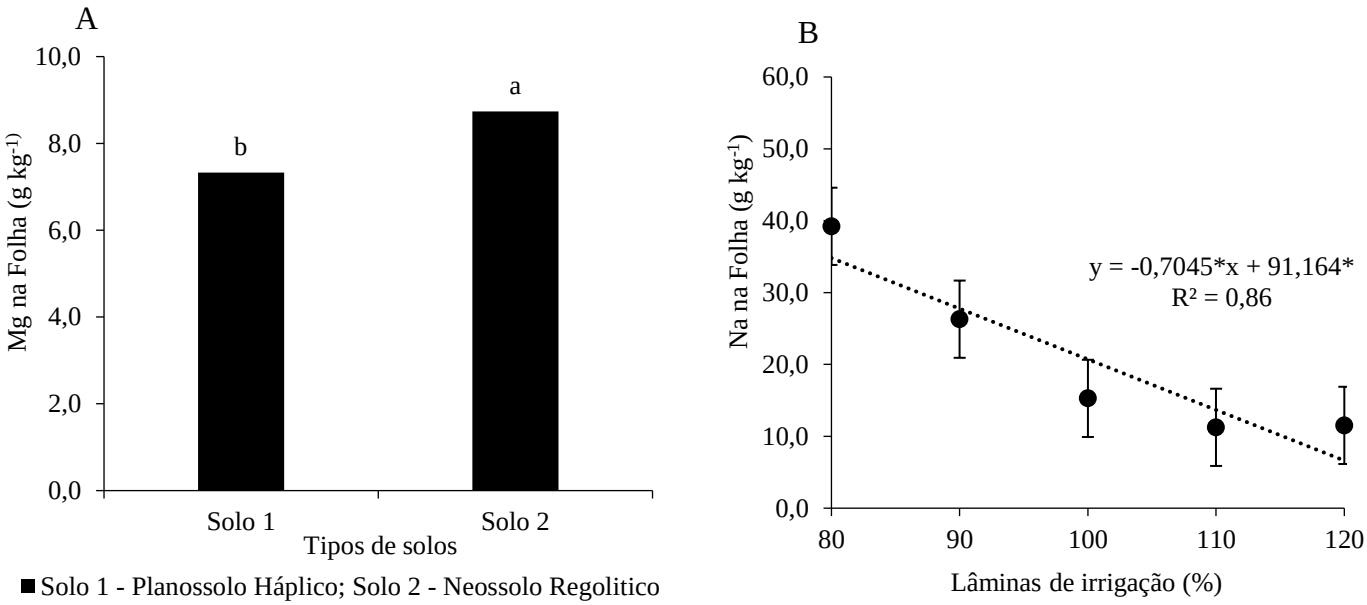
O teor de sódio (Na) na folha do milho reduziu linearmente em função do aumento das lâminas de reposição da ETc (Figura 4B). O teor máximo de Na foi obtido na menor lâmina estudada (80% ETc) correspondente a 34,80 g kg^{-1}, revelando um decréscimo de 80,97% para cada aumento unitário da lâmina de reposição da ETc.

Os teores de Na variaram entre 6,62 a 34,80 g kg^{-1}, comportamento semelhante ao encontrado por Sousa et al. (2012) na cultura do pinhão manso, que constataram decréscimo de 71% com aumento das lâminas de reposição da ETc, e valor máximo estimado de 17,03 g kg^{-1} de N nas folhas.

O maior teor de sódio foi encontrado com a lâmina de reposição de 80% da ETc, que continha maior concentração de sódio acumulado da irrigação com água residuária, devido ao déficit hídrico, contribuindo para o aumento dos teores de sódio nas folhas, aos 80 DAS. A maioria das espécies que utilizam as rotas C4 de fixação de carbono, como é o caso do milho, requer íons sódio, por estar envolvido na transferência de metabólitos entre os cloroplastos das

células do mesófilo e da bainha vascular das plantas (Korndorfer, 2007); no entanto, o acúmulo do íon sódio em excesso, principalmente nas folhas, resulta na inibição do crescimento (Azevedo Neto e Tabosa, 2000; Ferreira et al. 2005), em função de sua ação tóxica sobre o metabolismo celular (Munns, 2002). Semelhante ao observado nesse trabalho, Garcia et al. (2007) e Oliveira et al. (2009) também verificaram aumento da concentração de sódio na parte aérea de plantas de milho cultivado em ambientes salinos.

Figura 4. Teores de magnésio (A) e sódio (B) na folha do milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos (B), Recife, 2019. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



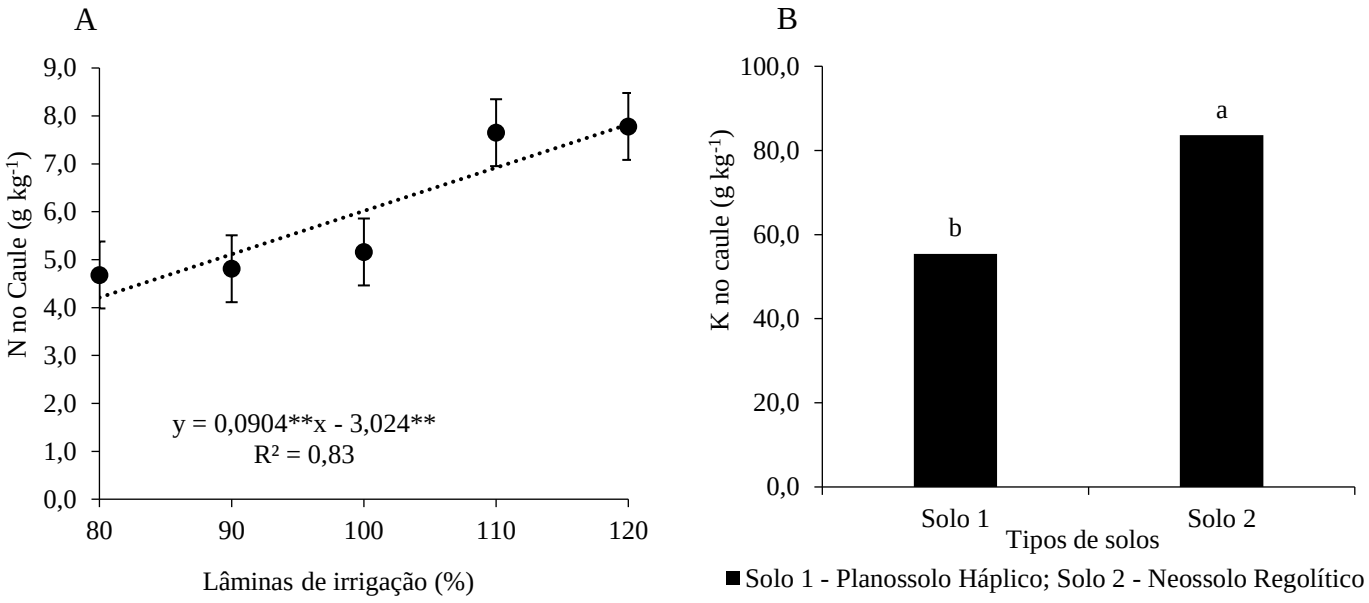
■ Solo 1 - Planossolo Háplico; Solo 2 - Neossolo Regolitico

O teor de N no caule do milho mostrou tendência de crescimento linear em função do aumento das lâminas de reposição da ETc aplicadas (Figura 5A), com teores médios estimados de 4,20 e 7,82 g kg^{-1} para as lâminas de 80 e 120% da ETc, registrando-se incremento de 86,19%.

Desse modo, verifica-se que o aumento da disponibilidade de água no solo promoveu o aumento do teor deste nutriente na faixa de solo explorada pelo sistema radicular da cultura, otimizando a absorção e translocação até o caule. Segundo Almeida et al. (2002), a absorção de nutrientes pelas plantas está diretamente relacionada à disponibilidade destes e da água no solo. Assim, um incremento na lâmina aplicada para uma mesma adubação pode levar a maior absorção de nutrientes pelas plantas, resultando em maiores teores de nutrientes nestas.

Quanto ao efeito dos tipos de solos, observa-se na Figura 5B que o Neossolo Regolitico apresentou um teor de K de 83,62 g kg^{-1}, enquanto que o Planossolo Háplico apresentou um teor de 55,39 g kg^{-1}, apresentando um incremento de 50,96%.

Figura 5. Teores de nitrogênio e potássio no caule do milho em função das lâminas de reposição da ETc (A) e tipos de solos (B), Recife, 2019. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



Avaliando o teor de cálcio (Ca) no caule, observou-se uma tendência linear decrescente em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 6A), apresentando um teor ajustado de 3,64 g kg^{-1} aplicando-se 80% da ETc, constatando-se um decréscimo de 66,21% para cada aumento de 1% da lâmina de reposição da ETc.

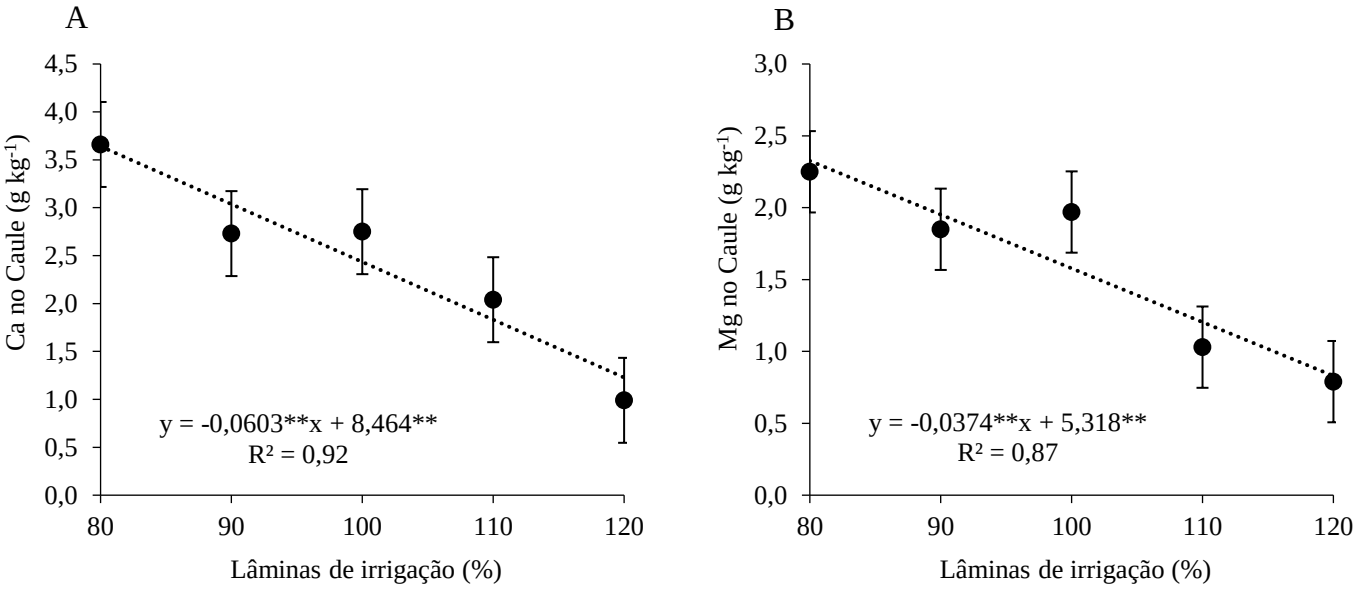
Em relação ao teor Mg no caule do milho, verificou-se um comportamento linear decrescente em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 6B), revelando um decréscimo de 64,37%, com teor máximo de Mg na lâmina de 80% da ETc (2,33 g kg^{-1}) para cada aumento unitário da lâmina de reposição da ETc.

É importante destacar que as menores lâminas de irrigação provocaram aumento nos teores de cálcio e magnésio nas folhas e caule do milho. Diferentemente dos resultados obtidos nesse trabalho, outros estudos têm demonstrado que a salinidade diminui os teores de Ca na parte aérea das plantas de milho (Azevedo Neto e Tabosa, 2000; Garcia et al., 2007). Corroborando com o resultado do presente estudo, Sousa et al. (2010) também verificaram

aumento dos teores de cálcio em folhas e magnésio em caule de milho com aumento da concentração de sais.

Salienta-se que o efeito do Na sobre o Ca em condições de salinidade é verificado, principalmente, quando se utiliza apenas o NaCl como agente estressante. No presente estudo, a água residuária utilizada possui uma mistura de sais de sódio, cálcio e magnésio, o que justifica, pelo menos em parte, os aumentos nos teores de cálcio e magnésio nos tratamentos sob déficit hídrico.

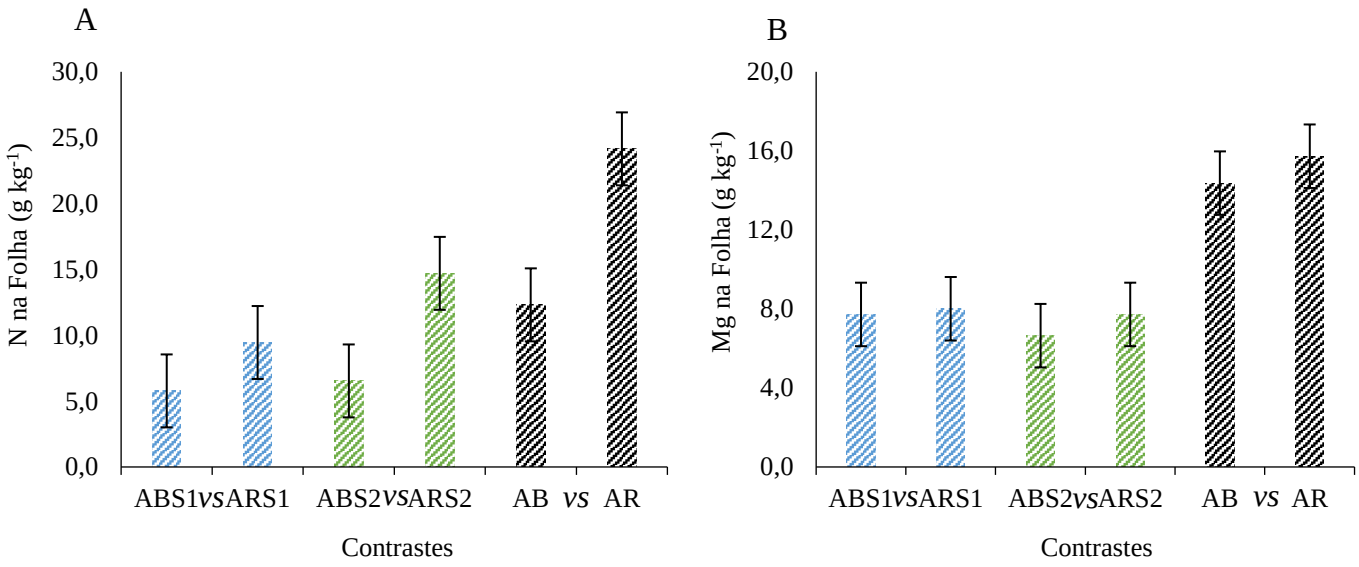
Figura 6. Teores de cálcio (A) e magnésio (B) no caule do milho em função das lâminas de reposição da ETc, Recife, 2019.



Utilizando os contrastes ortogonais ABS1 *vs* ARS1 (Figura 7A), observou-se que a água residuária no solo 1 proporcionou maior teor médio de N (9,45 g kg^{-1}) diferindo significativamente ($p<0,01$), sendo inclusive superior em 63,49% em relação à média de ABS1, que apresentou teor de N (5,78 g kg^{-1}). Em relação ao contraste ABS2 *vs* ARS2, verificou-se efeito significativo ($p<0,01$), constatando-se também a influência da água residuária no solo 2, revelando teor médio de N (14,70 g kg^{-1}) quando comparado com água de abastecimento (6,53 g kg^{-1}), obtendo-se incremento de 125,11%. Quando analisado apenas os tipos de águas AB *vs* AR, percebeu-se um acréscimo de 96,18% na água residuária sobre a água de abastecimento, que apresentou teor médio de N (12,31 g kg^{-1}) quando comparado com o teor de N na água residuária (24,15 g kg^{-1}).

Na Figura 7B, não se observou efeito significativo para Mg entre os contrastes ABS2 *vs* ARS2, havendo diferença significativa (p<0,01) no contraste ABS1 *vs* ARS1 de (8,01 g kg^{-1}), com incremento de 3,76% em relação a água de abastecimento (7,72 g kg^{-1}), diferindo significativamente (p<0,01). Para o contraste AB *vs* AR notou-se efeito significativo (p<0,01), sendo maior teor de Mg na água residuária (15,73 g kg^{-1}) em relação a água de abastecimento que apresentou valor médio de Mg de (14,37 g kg^{-1}), com incremento de 9,46%.

Figura 7. Teste de contraste para os teores de nitrogênio e magnésio na folha de plantas de milho irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR) aos 80 DAS. (**) Significativo a 0,01 e 0,05 de probabilidade, pelo teste F.



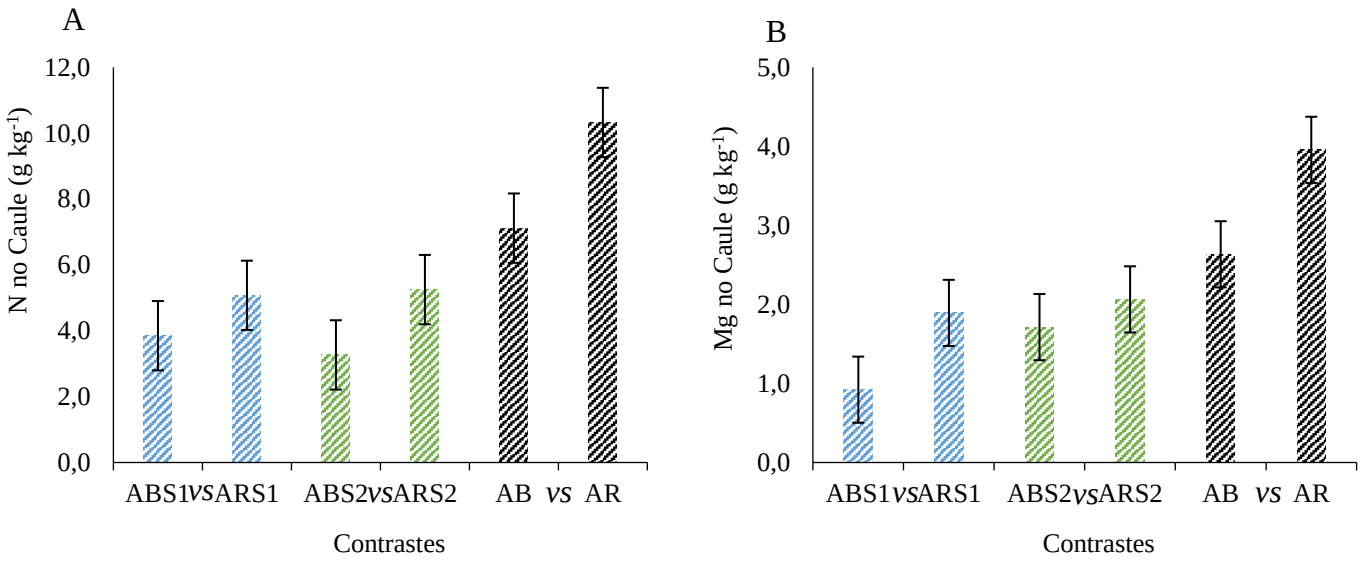
Na Figura 8A observa-se que, para o teor de N no caule, houve efeito significativo no contraste ABS1 *vs* ARS1 (p<0,05), onde se percebeu que a utilização de água residuária proporcionou um aumento médio na concentração de N de 31,95% em relação à utilização da água de abastecimento. Para o contraste ABS2 *vs* ARS2, verificou-se também aumento no teor de N quando utilizado água residuária apresentando (5,25 g kg^{-1}), diferindo significativamente (p<0,01) comparado com água de abastecimento (3,27 g kg^{-1}), revelando assim acréscimo de 60,55%. Ao analisar o teor de N no contraste AB *vs* AR, observou-se aumento de 45,08% quando irrigado com água residuária, que apresentou teor médio de (10,33 g kg^{-1}) em comparação a água de abastecimento (7,12 g kg^{-1}).

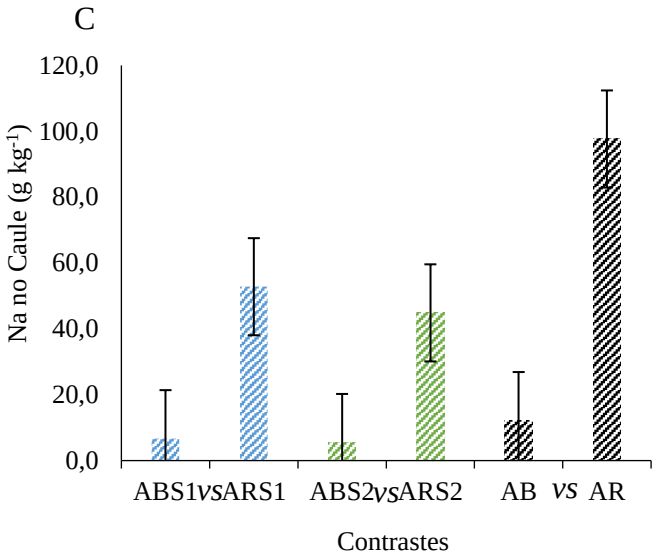
Quanto ao Mg no caule, observou-se efeito significativo em todos os contrastes (p<0,05), exceto o contraste (ABS2 *vs* ARS2). Dessa forma, observou-se que o tratamento AR apresentou

maior teor (1,89 g kg^{-1}), revelando aumento de 105,43% quando comparado ao tratamento AB, que apresentou teor médio de (0,92 g kg^{-1}). Em relação ao contraste AB *vs* AR, constatou-se que o tratamento AR apresentou maior média de teor de Mg no caule (3,96 g kg^{-1}), em comparação ao tratamento AB (2,63 g kg^{-1}), apresentando acréscimo de 50,57% (Figura 8B).

Através da aplicação de contrastes ortogonais (Figura 8C) observou-se para Na no caule efeito significativo entre todos os contrastes analisados ($p<0,01$). Verificou-se que o teor de Na para o contraste ABS1 *vs* ARS1 foi maior sobre o efeito da água residuária (52,80 g kg^{-1}) em relação à água de abastecimento, que apresentou teor médio (6,65 g kg^{-1}), registrando acréscimo de 693,98%. Quanto ao contraste ABS2 *vs* ARS2, também se observou maior teor de Na no tratamento AR de (44,83 g kg^{-1}) em comparação ao tratamento AB (5,50 g kg^{-1}), revelando incremento de 715,09%. Em relação ao contraste AB *vs* AR, verificou-se teor de Na no tratamento AR de 97,66 g kg^{-1}, com aumento de 704,44% quando comparado ao tratamento AB, que apresentou teor de 12,14 g kg^{-1}.

Figura 8. Teste de contraste para os teores de nitrogênio, magnésio e sódio no caule de plantas de milho irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR) aos 80 DAS. (**) Significativo a 0,01 e 0,05 de probabilidade, pelo teste F.





Para todos os nutrientes avaliados, a análise foliar revelou que os tratamentos irrigados com água residuária apresentaram maiores valores em relação aos tratamentos irrigados com água de abastecimento. Esses resultados são explicados pela maior biodisponibilidade dos elementos na água residuária, conforme demonstrado também em outros estudos (Almeida et al., 2012; Andrade-Filho et al., 2013; Rocha et al., 2014; Malafaia et al., 2016).

3.2 Acúmulo de nutrientes

Por meio da análise de variância para acúmulo de nutrientes na folha do milho verificou-se efeito significativo do fator isolado lâminas de reposição da ETc apenas para N e Na ($p<0,01$) e ($p<0,05$), respectivamente. Para o fator isolado tipos de solos, houve efeito significativo apenas para N ($p<0,05$), como também efeito significativo do fator lâmina de reposição da ETc apenas para N ($p<0,01$) no caule (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da ANOVA para acúmulo de nutrientes na folha e caule de plantas de milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solo.

		Quadrado Médio						
		Folha						
Fontes de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	S	Na
Lâminas (L)	4	163,48**	7,49^{ns}	1269,01^{ns}	22,32^{ns}	15,98^{ns}	0,071^{ns}	15,60*
Solos (S)	1	210,22*	0,43^{ns}	87,02^{ns}	47,02^{ns}	60,93^{ns}	0,009^{ns}	14,56^{ns}
Lx S	4	29,30^{ns}	1,99^{ns}	1515,93^{ns}	19,04^{ns}	17,72^{ns}	0,158^{ns}	0,37^{ns}
Bloco	3	30,88^{ns}	33,28**	2243,59^{ns}	4,07^{ns}	76,50^{ns}	0,947**	3,73^{ns}
Resíduo	27							
CV	%	29,61	29,86	36,46	32,21	34,20	20,76	45,54
		Caule						
Fontes de variação	GL	N	P	K	Ca	Mg	S	Na

Lâminas (L)	4	4,48**	0,55^{ns}	8,66^{ns}	2,01^{ns}	0,91^{ns}	0,22^{ns}	3,02^{ns}
Solos (S)	1	0,69^{ns}	0,09^{ns}	50,26^{ns}	0,02^{ns}	0,11^{ns}	0,54^{ns}	10,34^{ns}
Lx S	4	0,08^{ns}	0,39^{ns}	13,34^{ns}	0,43^{ns}	0,15^{ns}	0,22^{ns}	5,04^{ns}
Bloco	3	0,73^{ns}	1,01^{ns}	26,14^{ns}	15,03**	0,24^{ns}	1,18*	13,00^{ns}
Resíduo	27							
CV	%	19,97	18,78	29,50	43,45	26,13	21,72	30,21

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns}Não significativo, pelo teste F.

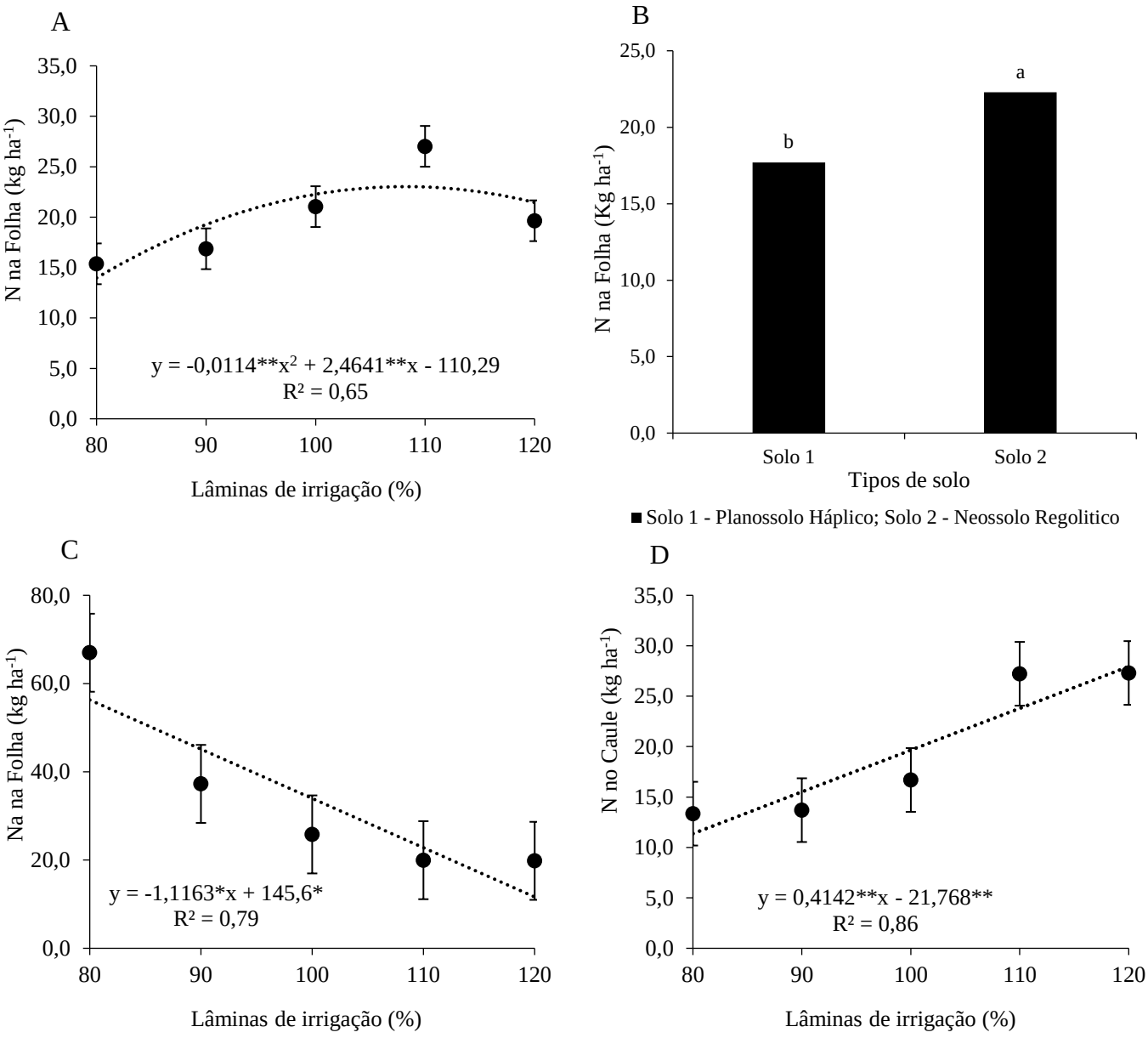
Para o acúmulo de N nas folhas do milho, observou-se comportamento quadrático em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 9A), obtendo-se acúmulo máximo de 22,86 kg ha^{-1} na lâmina de 108,07% da ETc, representando um acréscimo de 64,68% em relação à lâmina de 80% da ETc. O acúmulo de N pelo milho no presente estudo foi superior ao encontrado por Aita et al. (2001), 20,5 kg ha^{-1}, em 1.190 kg ha^{-1} de matéria seca, e inferior ao encontrado por Torres et al. (2005), que constataram 46,6 kg ha^{-1} de N, com 2.100 kg ha^{-1} de matéria seca, com a cultura do milho e plantas de cobertura. Borges et al. (2014), analisando o acúmulo de N na cultura do milheto, obtiveram 20 kg ha^{-1}, semelhante ao encontrado no presente estudo.

Em relação ao efeito dos tipos de solo, observa-se na Figura 9B que o solo 2 foi o que proporcionou maior acúmulo médio de N (22,28 kg ha^{-1}), evidenciando incremento de 25,95% em relação ao solo 1, que apresentou 17,69 kg ha^{-1}.

Avaliando o acúmulo de Na nas folhas do milho, verificou-se uma tendência linear decrescente em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 9C), apresentando um acúmulo máximo de 56,30 kg ha^{-1} aplicando-se 80% da ETc, constatando-se um decréscimo de 79,32% para cada aumento de 1% da lâmina de reposição da ETc.

O acúmulo de N no caule do milho apresentou tendência de crescimento linear em função do aumento das lâminas de reposição da ETc (Figura 9D), com acúmulos médios estimados de 11,37 e 27,94 kg ha^{-1} para as lâminas de 80 e 120% da ETc, com incremento de 145,73%, evidenciando que a disponibilidade hídrica favorece o acúmulo de N pelas plantas de milho.

Figura 9. Acúmulo de nutrientes na folha e caule das plantas de milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solo.

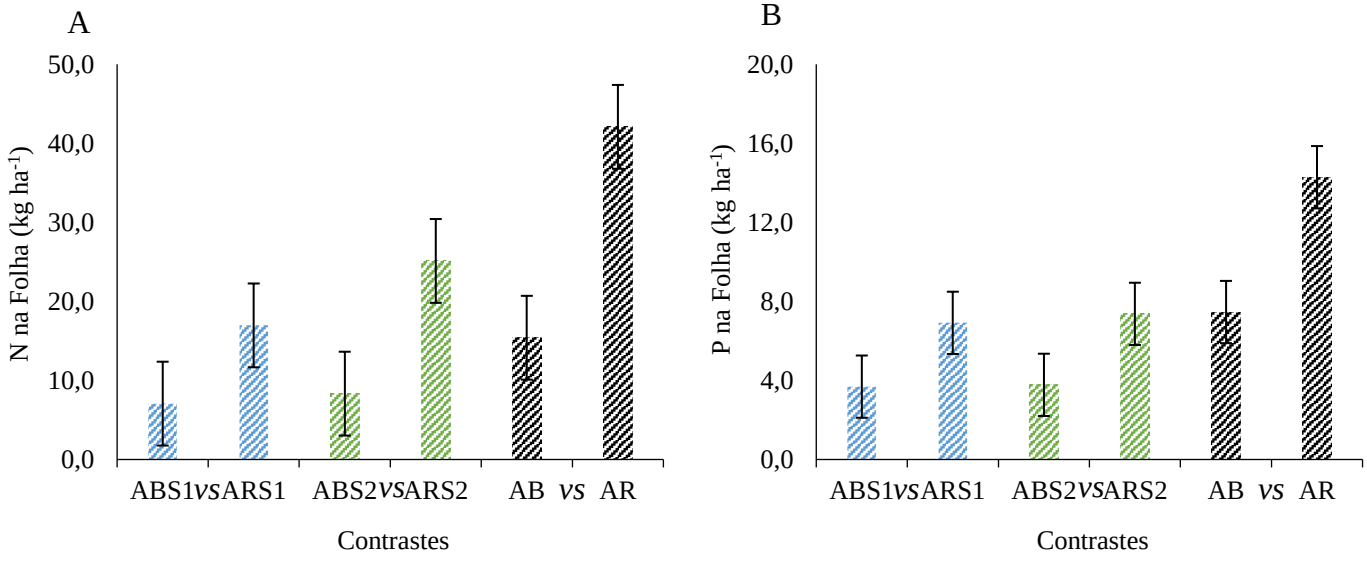


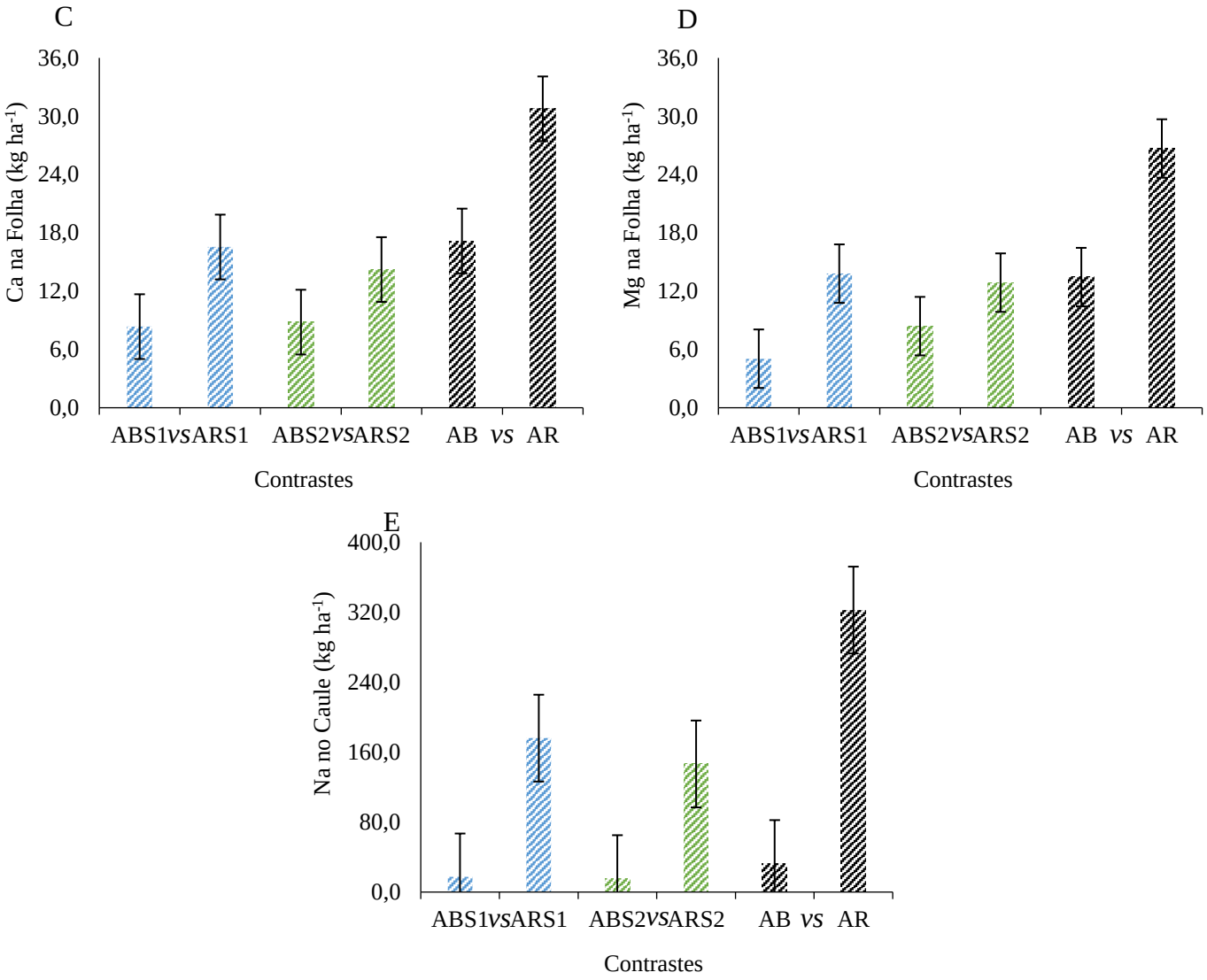
Com relação ao acúmulo de macronutrientes no final do experimento aos 80 DAS na folha e caule, a ordem decrescente dos nutrientes foi K > N > Ca > Mg > P > S e K > N > P > Ca > S > Mg para os solos 1 e 2, respectivamente. Von Pinho et al. (2009) obtiveram uma ordem decrescente de extração de macronutrientes na cultura do milho de: N > K > P >Ca > Mg > S. Já Sousa et al. (2010) obtiveram uma ordem decrescente de extração de macronutrientes pela cultura do milho de: K > Mg > Ca > P. Já Gondim et al. (2016), obtiveram

a seguinte ordem decrescente de macronutrientes para a cultura do milho K > N > Ca > P> Mg > S.

Analisando os contrastes ortogonais (Figura 10A), observou-se efeito significativo entre todos os contrastes analisados (p<0,01) para N na folha. Para contraste ABS1 *vs* ARS1 percebeu-se que o tratamento AR no solo 1 proporcionou maior acúmulo médio de N (16,97 kg ha^{-1}), representando um aumento de 140,03% em relação à média de AB, que registrou acúmulo de 7,07 kg ha^{-1}. Quanto ao contraste ABS2 *vs* ARS2, constatou-se também a influência da água residuária no solo 2, revelando acúmulo médio de N de 25,12 kg ha^{-1} quando comparado com água de abastecimento (8,33 kg ha^{-1}), obtendo-se incremento de 201,56%. Ao analisar os tipos de águas AB *vs* AR, percebeu-se um acréscimo de 173,31% sobre a água de abastecimento, que representou acúmulo médio de N de 15,40 g kg^{-1} quando comparado com o acúmulo de N na água residuária (42,09 g kg^{-1}).

Figura 10. Teste de contraste para acúmulo de nutrientes na folha e no caule de plantas de milho irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas para os tipos de água (AB, AR) aos 80 DAS. (**) Significativo a 0,01 e 0,05 de probabilidade pelo teste F.





Quanto ao acúmulo de P na folha (Figura 10B), verificou-se efeito significativo em todos os contrastes ($p<0,01$). Para contraste ABS1 *vs* ARS1, notou-se que o tratamento AR apresentou maior acúmulo (6,92 kg ha^{-1}), registrando aumento de 87,53% quando comparado ao tratamento AB, que apresentou acúmulo médio de 3,69 kg ha^{-1}. Em relação ao contraste AB *vs* AR, constatou-se que o tratamento AR apresentou maior média de acúmulo de P (7,37 kg ha^{-1}) em comparação ao tratamento AB (3,78 kg ha^{-1}), apresentando acréscimo de 94,97%. Ao comparar o contraste AB *vs* AR, verificou-se incremento de 91,55% em relação ao tratamento com AB que por sua vez apresentou acúmulo médio de 7,46 kg ha^{-1} em comparação ao tratamento com AR (14,29 kg ha^{-1}).

Quanto ao Ca na folha, observou-se efeito significativo em todos os contrastes ($p<0,05$) e ($p<0,01$), respectivamente, exceto o contraste ABS2 *vs* ARS2. Dessa maneira, percebeu-se no contraste ABS1 *vs* ARS1 que o tratamento AR apresentou maior acúmulo (16,54 kg ha^{-1}),

revelando aumento de 98,08% quando comparado ao tratamento AB que apresentou acúmulo médio de 8,35 kg ha^{-1}. Em relação ao contraste AB *vs* AR, constatou-se que o tratamento AR apresentou maior média de acúmulo de Ca (30,76 kg ha^{-1}) em comparação ao tratamento AB (17,16 kg ha^{-1}), apresentando acréscimo de 79,25% (Figura 10C).

Quanto ao acúmulo de Mg na folha, apresentou efeito significativo ($p<0,01$) apenas para os contrastes ABS1 *vs* ARS1; AB *vs* AR. Observou-se no contraste ABS1 *vs* ARS1 que o tratamento AR apresentou maior acúmulo (13,80 kg ha^{-1}), revelando aumento de 173,27% quando comparado ao tratamento AB, que apresentou acúmulo médio de 5,05 kg ha^{-1}. Em relação ao contraste AB *vs* AR, constatou-se que o tratamento AR apresentou maior média de acúmulo de Ca (26,68 kg ha^{-1}) em comparação ao tratamento AB (13,45 kg ha^{-1}), apresentando aumento de 98,36% (Figura 10D).

Na Figura 10E, observa-se efeito significativo em todos os contrastes analisados ($p<0,01$) e ($p<0,05$), respectivamente, para acúmulo de sódio no caule. Ao analisar o contraste ABS1 *vs* ARS1, verificou-se que o tratamento com água residuária proporcionou aumento no acúmulo médio de Na no caule de 176,01 kg ha^{-1} quando comparado ao tratamento com água de abastecimento (17,27 kg ha^{-1}), evidenciando um acréscimo de 919,16%. Em relação ao contraste ABS2 *vs* ARS2, percebeu-se também que o tratamento com água residuária possibilitou maior acúmulo (146,45 kg ha^{-1}), com acréscimo de 854,07% quando comparado ao tratamento com água de abastecimento que apresentou 15,35 kg ha^{-1}. Comparando-se os tipos de águas, observou-se que no contraste AB *vs* AR, o tratamento com água residuária apresentou acúmulo de 322,46 kg ha^{-1}, proporcionando acréscimo de 888,23% em relação ao tratamento com água de abastecimento, que por sua vez apresentou acúmulo de 32,63 kg ha^{-1}.

3.3 Produção de biomassa

A análise de variância dos componentes de produção do milho aos 80 DAS, estão resumidas na Tabela 6. As lâminas de irrigação ocasionaram efeito significativo ($p<0,01$) e ($p<0,05$) nas variáveis MFF, MSF, MSC e MST. Verificou-se ainda efeito significativo ($p<0,01$) para variável PECP nos fatores lâminas de irrigação e solos, isoladamente. Para variável PESP ocorreu efeito significativo ($p<0,01$) da interação.

Tabela 6. Resumo da ANOVA para os componentes de produção do milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos.

		Quadrado Médio						
Fontes de variação	GL	MFF	MSF	MFC	MSC	MST	PECP	PESP
Lâminas (L)	4	3975,06**	484,67**	3888,60^{ns}	1177,71*	1820,97*	4475,04**	1057,24^{ns}
Solos (S)	1	318,82^{ns}	16,34^{ns}	19678,09^{ns}	38,06^{ns}	56,92^{ns}	5722,38**	655,61^{ns}
Lx S	4	277,64^{ns}	118,60^{ns}	5052,80^{ns}	110,79^{ns}	78,45^{ns}	5266,40^{ns}	4394,35**
Bloco	3	100,91^{ns}	33,42^{ns}	10321,52^{ns}	315,76^{ns}	522,18^{ns}	93,71^{ns}	640,40^{ns}
Resíduo	27							
CV	%	19,72	13,59	32,3	30,5	21,48	12,52	20,55

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} Não significativo, pelo teste F.

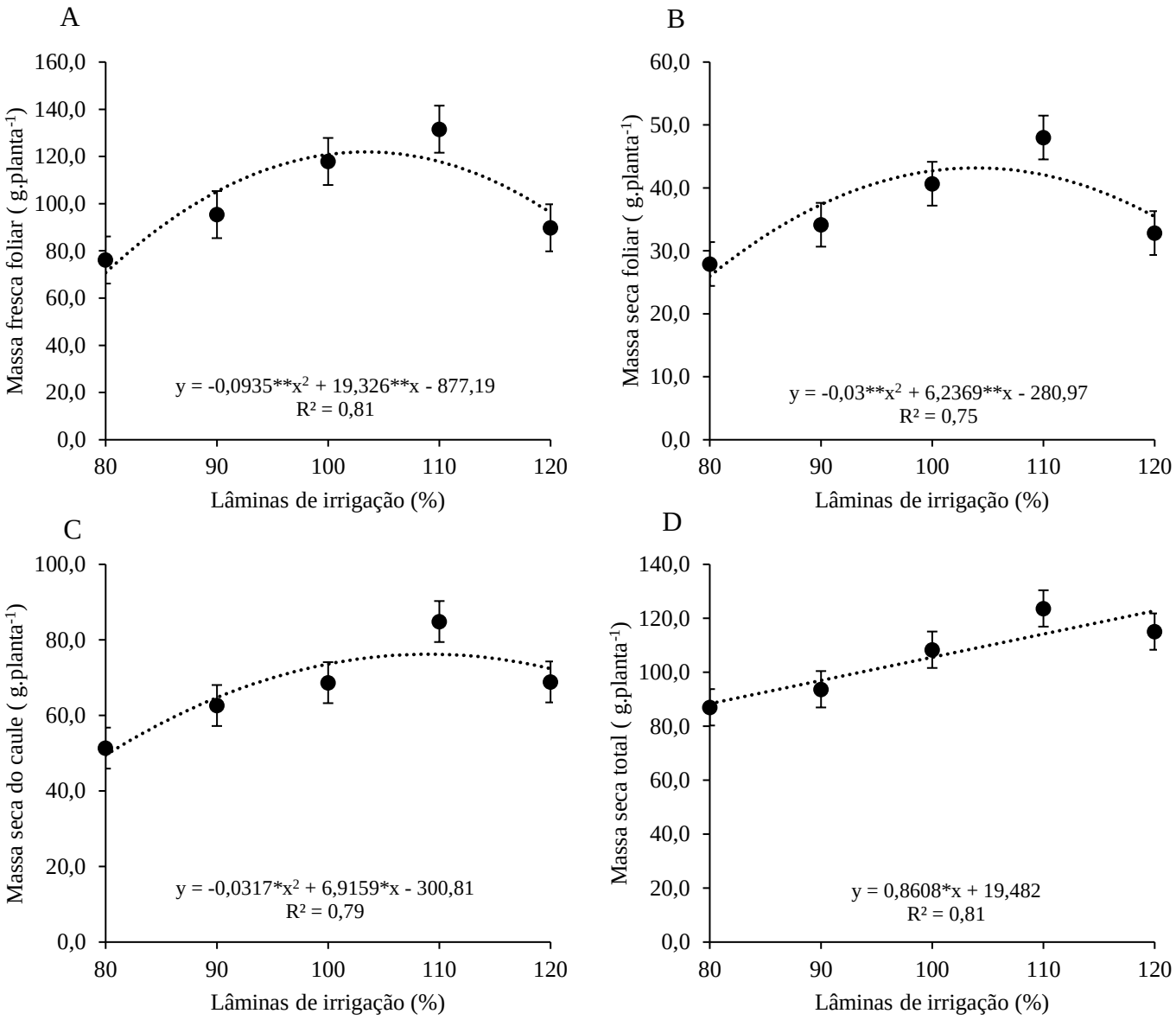
Na Figura 11A, constatou-se um ajuste quadrático dos dados para MFF com incremento das lâminas de irrigação. Verifica-se que a máxima MFF do milho da ordem de 121,44 g planta^{-1} foi impulsionada quando se elevou a lâmina de irrigação com água de esgoto doméstico tratado até 103,35% da ETc, com incremento de 72,30% sobre a lâmina de irrigação de 80% da ETc.

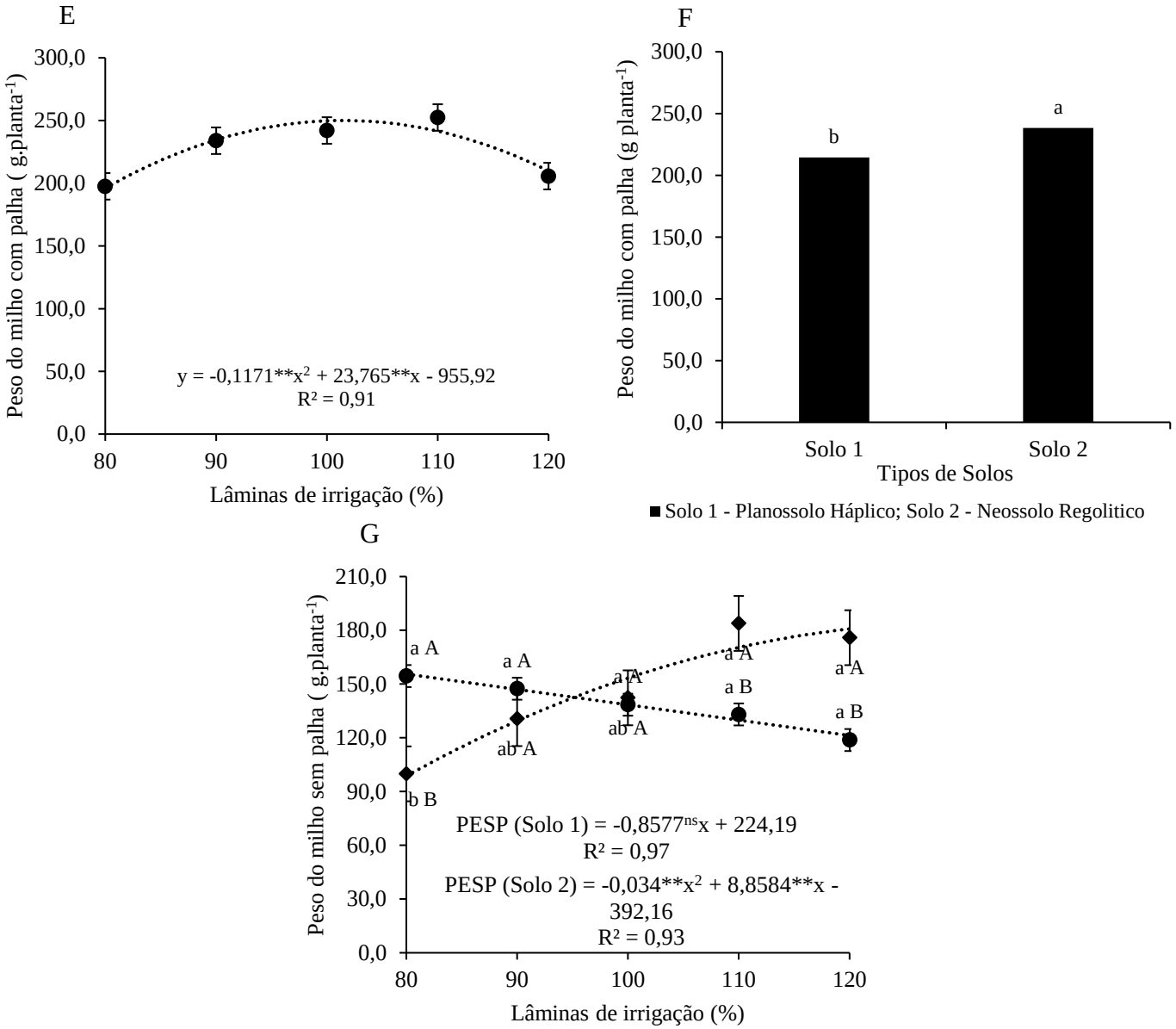
Os resultados expostos na Figura 11B evidenciam comportamento quadrático para MSF em função das lâminas de reposição da ETc, onde se observa que a lâmina de irrigação de 103,95% da ETc induziu um valor máximo de MSF de 43,19 g planta^{-1}, apresentando incremento de 66,23% em relação a lâmina de 80% da ETc. Os resultados corroboram com o trabalho de Souza et al. (2014), que adotaram como base para irrigação a evapotranspiração de referência (ETo) e verificaram que maior acúmulo de biomassa seca da parte aérea foi obtido com lâminas próximas a 100%.

Como resposta ao estresse hídrico, as plantas reduzem a produção de biomassa foliar, seja pela redução no tamanho das folhas, seja com a diminuição da quantidade de folhas por planta, buscando assim reduzir a transpiração para diminuir as perdas de água pelas folhas (Silva et al., 2013).

Do ponto de vista nutricional, sugere-se que os resultados de MFF E MSF observado para o fator lâmina (L) estejam relacionados com os nutrientes presentes na água de esgoto doméstico tratado, principalmente potássio e nitrogênio, contribuindo para aumento da biomassa foliar do milho. Observou-se ainda que o acúmulo máximo de N correspondeu a 22,86 kg ha^{-1} em 2056,66 kg ha^{-1} de matéria seca do milho.

Figura 11. Componentes de produção do milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos.





De acordo com a análise de regressão, o modelo quadrático ajustou-se aos dados de MSC em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 11C), com valor máximo de 76,40 g planta^{-1} quando estimado com lâmina correspondente a 109,08% da ETc, revelando um incremento de 54,09%, sobre a lâmina de 80% da ETc. Brito et al. (2013), trabalhando com milho sob estresse hídrico, observaram que a massa seca do colmo é muito sensível ao estresse hídrico e destacaram que lâminas inferiores a 80% da ETc influenciam negativamente no crescimento das plantas de milho.

Em relação a MST do milho em função das lâminas de reposição da ETc observa-se na Figura 11D que o modelo linear crescente melhor se ajustou aos dados, no qual apresentou valor máximo 122,78 g planta^{-1}, equivalente à 5846,66 kg ha^{-1} (5,85 t ha^{-1}), na lâmina correspondente a 120% da ETc, evidenciando um acréscimo de 38,97% em relação a lâmina de irrigação de

80% da ETc. Simões et al. (2017), trabalhando com milho forrageiro observaram aumento da biomassa seca total quando irrigado com reposição hídrica de 120% da ETc, alcançando uma média de 9,7 t ha^{-1}. Santos Junior et al. (2015) investigaram a viabilidade da aplicação de efluente de urina humana em diferentes solos na produção de biomassa seca da parte aérea do milheto, que apresentou 140 g $planta^{-1}$, quando cultivado em Luvissolo, e 109 g $planta^{-1}$, quando cultivado em Neossolo.

Rebouças et al. (2010), trabalhando com feijão-caupi irrigado com água residuária de esgoto doméstico tratado, também observaram um efeito positivo para a biomassa total, onde as plantas irrigadas apenas com efluentes doméstico aumentaram a produção da matéria seca total em 117,07%, evidenciando que a quantidade de nitrogênio existente na água residuária supriu suficientemente as plantas na ausência da adubação mineral do solo, elevando a produção de fitomassa seca e demais variáveis.

Já Rostamza et al. (2011), trabalhando com déficit hídrico em milheto irrigado com água de qualidade, no Irã, concluíram que a variação da redução água disponível no solo de 40 para 100% resultou numa diminuição progressiva na matéria seca total.

Na Figura 11E, observa-se o efeito quadrático do PECP em função das lâminas de reposição da ETc. O PECP máximo obtido foi de 249,83 g $planta^{-1}$, na lâmina de irrigação de 101,47% da ETc, apresentando incremento de 27,56% quando comparado à lâmina de 80% da ETc.

De acordo com o resultado, observa-se que, com o uso do esgoto doméstico tratado na irrigação com lâmina de 101,47% da ETc, foi possível obter produtividade satisfatória para o milho forrageiro, chegando-se a 2,52 kg por 10,08 m^2, equivalente à 25,18 t ha^{-1}. Azevedo et al. (2007) observaram que, com o uso da água residuária tratada na fertirrigação, foi possível obter produtividade satisfatória para o milho forrageiro, chegando-se a 117,318 kg por 40 m^2 (29,33 t ha^{-1}) apresentando produtividade semelhante ao encontrado nesse trabalho. Nos estudos de Costa et al. (2014), também trabalhando com água residuária na produção do milho forrageiro, constataram que as maiores lâminas com água residuária proporcionaram maior peso médio de espiga com e sem palha, obtendo-se média de 4,654 kg por 12,5 m^2 equivalente à 37,23 t ha^{-1}. Araújo et al. (2019), analisando o uso de urina humana associada à manipueira na produtividade do milho, também obtiveram resposta significativa de 222,32 g $planta^{-1}$, corroborando com os resultados no presente estudo.

Quanto ao efeito isolado dos tipos de solos, observa-se na Figura 11F que o maior PECP foi registrado no solo 2, tendo-se obtido um valor de 238,26 g.planta^{-1}, com incremento de 11,15% em relação ao solo 1, a que representa produtividade máxima de 24,01 t ha^{-1} de PECP na cultura do milho. Blanco et al. (2009), avaliando a produção do milho sob lâminas de irrigação, encontraram produtividade máxima de 14,36 t ha^{-1} e 11,58 t ha^{-1} de espigas com e sem palha, respectivamente.

Constatou-se por intermédio da Figura 11G o efeito da interação entre as lâminas de reposição da ETc e os tipos de solos sobre o PESP. De acordo com a análise do desdobramento do fator lâminas de reposição da ETc dentro do fator tipos de solos, houve diferença significativa apenas para o solo 2 em todas as lâminas de reposição da ETc avaliadas, com constatação de incrementos da ordem de 46,49; 29,3; 16,85, 7,56 e 1,95% para as lâminas de 80, 90, 100, 110 e 120% da ETc, respectivamente. Ao analisar o efeito dos tipos de solos dentro do fator lâminas de irrigação, nota-se diferença significativa para lâminas de 80, 110 e 120% da ETc.

4.0 CONCLUSÕES

Os maiores teores de N da folha e caule do milho foram obtidos com a aplicação de lâminas superiores a 100% da evapotranspiração da cultura;

A salinidade da água de irrigação utilizada em lâminas sob déficit hídrico (80% da ETc), contribuiu para aumento dos teores de Na, K, Ca e Mg na parte aérea do milho;

O estado nutricional do milho foi influenciado pelo tipo de água de irrigação, apresentando melhor equilíbrio nutricional quando foi irrigado com água residuária;

Neossolo Regolitico contribuiu para maiores teores de N, K e Mg às plantas que o Planossolo Háplico, havendo uma correspondência na capacidade dos nutrientes.

Os maiores acúmulos de N da parte aérea do milho foram obtidos com lâminas superiores a 100% da reposição da ETc, bem como encontrado maior acúmulo em Neossolo Regolitico.

O acúmulo de N, P, Ca, Mg e Na aumentaram quando irrigado com água residuária em comparação a água de abastecimento.

O acúmulo de nutrientes pela cultura do milho em ambos os tipos de solos decresceu na seguinte ordem: K > N > Ca > Mg > P > S; K > N > P > Ca > S > Mg para folha e caule, respectivamente, para uma produtividade de espiga com palha de 25,18 t ha^{-1} e matéria seca total de 5,85 t ha^{-1}.

A cultivar BR 5026 (São José), apresenta-se sensível à restrição hídrica para fins de produção de silagem, sendo os maiores rendimentos dos componentes de produção alcançados a partir de lâminas de 100% e 120% da evapotranspiração da cultura.

REFERÊNCIAS

AITA, C.; BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; GONÇALVES, C. N.; ROS, C. O. Plantas de cobertura do solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n.2, p.157-165, 2001.

ALMEIDA, F. T.; BERNARDO, S.; MARINHO, C. S.; MARIN, S. L. D.; SOUSA, E. F. Teores de nutrientes do mamoeiro 'Improved Sunrise Solo 72/12' sob diferentes lâminas de irrigação, no Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.24, n.2, p.547-551, 2002.

ALMEIDA, J. P. N.; COSTA, L. R.; SAMPAIO, P. R. F.; AZEVEDO, J.; DIAS, N. S. Utilização de esgoto doméstico tratado na produção de mudas de maracujazeiro amarelo. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, n.4, p.69-75, 2012.

ANDRADE-FILHO, J. A.; SOUSA NETO, O. N.; DIAS, N. S.; NASCIMENTO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; COSME, C. R. Atributos químicos de solo fertirrigado com água residuária no semiárido brasileiro. **Irriga**, v.18, n. 4, p.661-674, 2013.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19.ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 1995. 1134p.

ARAÚJO, N. C. DE.; LIMA, V. L. A. DE.; SENA, L. F.; LIMA, G. S. DE.; ANDRADE, E. M. G.; CARDOSO, J. A. F.; OLIVEIRA, S. J. C. Produção de milho ‘Potiguar’ fertirrigado com água amarela e manipueira. **Revista de Ciências Agrárias**, v.42, n.1, p.166-174, 2019.

ARAÚJO, E. R.; SILVA, T. O. DA.; MENEZES, R. S. C.; FRAGA, V. DA S.; SAMPAIO, E. V. DE S. B. Biomassa e nutrição mineral de forrageiras cultivadas em solos do semiárido adubados com esterco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.9, p.890–895, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014.

AZEVEDO, M. R. Q.; KONIG, A.; BELTRÃO, N. E. M.; AZEVEDO, C. A. V.; TAVARES, T. L.; SOARES, F. A. L. Efeito da irrigação com água residuária tratada sobre a produção de milho forrageiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.2, n.1, p.63-68, 2007.

AZEVEDO NETO A. D.; TABOSA J. N. Estresse salino em plântulas de milho: Parte II - Distribuição dos macronutrientes catiônicos e suas relações com o sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.2, p.165-171, 2000.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento – Território Mata Sul Pernambucana – Clima**. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/território-mata-sul-pernambucana/arvore.Acesso em: 12 de Junho de 2019.

BLANCO, F. F.; VELOSO, M. E. DA C.; CARDOSO, M. J.; DUARTE, R. L. R.; OLIVEIRA, J. J. F. DE. Crescimento e produção do milho verde sob lâminas de irrigação e doses de fósforo. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 2, p.1640-1645, 2009.

BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S.; COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v. 29, n.5, p.1244-1254, 2013.

BORGES, W. L. B.; FREITAS, R. S. DE.; MATEUS, G. P.; SÁ, M. E. DE.; M. C. ALVES. Absorção de nutrientes e alterações químicas em Latossolos cultivados com plantas de cobertura em rotação com soja e milho. **Revista Brasileira de Ciência** do Solo, v.38, n.2, p.261-352, 2014.

CANTARELLA H.; DUARTE A. P (2004) **Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho.** In: Galvão J. C. C.; Miranda G. V (Eds.) Tecnologia de produção de milho. Viçosa, UFV. p.139-182.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JUNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2ª Aproximação. Recife – Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA, 2008. 212p.

COSTA, Z. V. B. DA.; GURGEL, M. T.; COSTA, L. R.; ALVES, S. M. C.; FERREIRA NETO, M.; BATISTA, R. O. Efeito da aplicação de esgoto doméstico primário na produção de milho no assentamento Milagres (Apodi-RN). **Revista Ambiente e Água**, v.9, n.4, p.737-751, 2014.

COSTA, M. S.; COSTA, Z. V. B; ALVES, S. M. C.; FERREIRA NETO, M; MARINHO, M. J. C. Avaliação nutricional do milho cultivado com diferentes doses de efluente doméstico tratado. **Irriga**, Edição Especial, p.12-26, 2012.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Série histórica das safras (2018).** Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historicas-das-safras. Acesso em: 12 de junho de 2019.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília -DF: Embrapa, 2017. 574 p.

ERTHAL, V. J. T.; FERREIRA, P. A.; MATOS, A. T. DE.; PEREIRA, O. G. Alterações físicas e químicas de um Argissolo pela aplicação de água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.5, p.467–477, 2010.

FERREIRA, N. M.; MESQUITA, E. F.; SÁ, F. V. S.; BERTINO, A. M. P.; PAIVA, E. P.; FARIAS, S. A. R. Crescimento e produtividade da mamoneira BRS Paraguaçu sob irrigação, cobertura do solo e adubação orgânica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.9, p.857-864, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FERREIRA, P. A. GARCIA, G. O.; SANTOS, D. B.; OLIVEIRA, F. G.; NEVES, C. L. Estresse salino em plantas de milho: II - Macronutrientes aniônicos e suas relações com o sódio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.2, p.11-15, 2005.

GARCIA, G. O.; FERREIRA, P. A.; MIRANDA, G. V.; NEVES, J. C. L.; MORAES, W. B.; SANTOS, D.B. Teores foliares dos macronutrientes catiônicos e suas relações com sódio em plantas de milho sob estresse salino. **Idesia**, v.25, n.3, p.93-106, 2007.

GRANGEIRO, L. C.; FREITAS, F. C. L.; NEGREIROS, M. Z.; MARROCOS, S. T. P.; LUCENA, R. R. M.; OLIVEIRA, R. A. Crescimento e acúmulo de nutrientes em coentro e rúcula. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.6, n.1, p.11-16, 2011.

GONDIM, A. R. DE O.; PRADO, R. DE M.; FONSECA, I. M.; ALVES, A. U. Crescimento inicial do milho cultivar BRS 1030 sob omissão de nutrientes em solução nutritiva. **Revista Ceres**, v.63, n.5, p.706-714, 2016.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 28/03/2019.

KORNDORFER, G. H. Elementos benéficos. In: Fernandes, M. S. **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: SBCS, 2007. cap.14, p.355-370.

LAVIOLA, B. G.; DIAS, L. A. S.; Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.1969-1975, 2008.

MALAFAIA, G.; RODRIGUES, A. S. DE L.; ARAÚJO, F. G. DE.; LEANDRO, W. M. Teor de nutrientes em folhas de milho fertilizado com vermicomposto de lodo de curtume e irrigado com água residuária doméstica. **Revista Ambiente e Água**, v.10, n.4, p.801-809, 2016.

MENEGHETTI, A. M.; NÓBREGA, L. H. P.; SAMPAIO, S. C.; FERQUES, R. G. Mineral composition and growth of babycorn under swine wastewater combined with chemical fertilization. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.11, p.1198–1205, 2012.

MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v.25, n.2, p.239-250, 2002.

OLIVEIRA, F. A.; MEDEIROS, J. F. DE.; OLIVEIRA, M. K. T.; LIMA, C. J. G. S.; ALMEIDA JÚNIOR, A. B.; AMÂNCIO, M. G. Desenvolvimento inicial do milho-pipoca irrigado com água de diferentes níveis de salinidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.2, p.149-155, 2009.

PRIOR, M.; SAMPAIO, S. C.; NÓBREGA, L. H. P.; DIETER, J.; COSTA, M. S. S. DE M. Estudo da associação de água residuária de suinocultura e adubação mineral na cultura do milho e no solo. **Engenharia Agrícola**, v.35, n.4, p.744-755, 2015.

QADIR, M.; WICHELNS, D.; RASCHID-SALLY, L.; MCCORNICK, P. G.; DRECHSEL, P.; BAHRI, A.; MINHAS, P. S. The challenges of wastewater irrigation in developing countries. **Agricultural Water Management**, v. 97, p.561-568, 2010.

REBOUÇAS, J. R. L.; DIAS, N. S.; GONZAGA, M. I. S.; GHEYI, H. R.; SOUSA NETO, O. N. Crescimento do feijão-caupi irrigado com água residuária de esgoto doméstico tratado. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p.97-102, 2010.

ROSTAMZA, M.; CHAICHI, M-R.; JAHANSOUZ, M-R.; ALIMADADI, A. Forage quality, water use and nitrogen utilization efficiencies of pearl millet (Pennisetum americanum L.) grown under different soil moisture and nitrogen levels. **Agricultural Water Management**, v.98, n.10, p.1607-1614, 2011.

ROCHA, S. A.; GARCIA, G. O.; LOUGON, M. S.; CECÍLIO, R. A.; CALDEIRA, M. V. W. Growth and nutrition leaf of *Eucalyptus* sp. due to use the different water qualities. **Revista de Ciências Agrárias**, v.37, n.2, p.141-151, 2014.

RUTKOWSKI, T.; RASCHID-SALLY, L.; BUECHLER, ST. Wastewater irrigation in the developing world-Two case studies from the Kathmandu Valley in Nepal. **Agricultural Water Management**, v.88, p.83-91, 2007.

SANT'ANA, E. V. P.; SANTOS, A. B.; SILVEIRA, P. M. Adubação nitrogenada na produtividade, leitura spad e teor de nitrogênio em folhas de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, n. 4, p. 491-496, 2010.

SANTOS, C. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, M. A. L.; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiração e coeficientes de cultura da *Moringa Oleifera* em condições semiáridas em Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.12, p.840-845, 2017.

SANTOS, O. S. N.; PAZ, V. P. DA S.; GLOAGUEN, T. V.; TEIXEIRA, M. B.; FADIGAS, F. DE S.; COSTA, J. A. Crescimento e estado nutricional de helicônia irrigada com água residuária tratada em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.8, p.820–827, 2012.

SANTOS JÚNIOR, J. A.; SOUZA, C. F.; PÉREZ-MARIN, A. M.; CAVALCANTE, A. R.; MEDEIROS, S. S. Interação urina e efluente doméstico na produção do milheto cultivado em solos do semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.456-463, 2015.

SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. L.; FILHO, J. V. P.; FREITAS, C. A. S. Trocas gasosas em plantas de girassol submetidas à deficiência hídrica em diferentes estádios fenológicos. **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.1, p.86-93, 2013.

SILVA, A. R. A. DA.; BEZERRA, F. M. L.; FREITAS, C. A. S. DE.; PEREIRA FILHO, J. V.; ANDRADE, R. R. DE,; FEITOSA, D. R. C. Morfologia e fitomassa do girassol cultivado com déficits hídricos em diferentes estádios de desenvolvimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.959-968, 2012.

SIMÕES, W. L.; GUIMARÃES, M. J. M.; OLIVEIRA NETO, H. T. DE.; OLIVEIRA A. R. de.; Voltolini, T. V. Ajuste da lâmina de irrigação no cultivo de milho para silagem no vale do submédio São Francisco. **Revista Científica Intelletto**, v.2, n.3, p. 95-104, 2017.

SOUZA, L. S. B.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Crescimento e produtividade do milho e feijão-caupi em diferentes sistemas e disponibilidade hídrica no Semiárido. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.7, n.3, p.524-539, 2014.

SOUSA, G. G. DE.; LACERDA, C. F. DE.; CAVALCANTE, L. F.; GUIMARÃES, F. V. A.; BEZERRA, M. E. DE J.; SILVA, G. L. da. Nutrição mineral e extração de nutrientes de planta de milho irrigada com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.11, p.1143–1151, 2010.

SCHITTENHELM, S. Chemical composition and methane yield of maize hybrids with contrasting maturity. **European Journal Agronomy**, Córdoba, v.29, n.2, p.72–79, 2008.

TEIXEIRA, L. A. J.; QUAGGIO, J. A.; MELLIS, E. V. Ganhos de eficiência fertilizante em bananeira sob irrigação e fertirrigação. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n.3, p.272-278, 2011.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J. C.; FABIAN, A. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.1, p.609-618, 2005.

VILELA, L.; SOUSA, D. M. G. DE; SILVA, J. E. DA. **Adubação potássica, Cerrado: Correção do solo e adubação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.

VON PINHO, R. G.; BORGES, I. D.; PEREIRA, J. L. DE A. R.; REIS, M. C. DOS. Marcha de absorção de macronutrientes e acúmulo de matéria seca em milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.8, n.2, p.157-173, 2009.

WALKER, C.; LIN, H. S. Soil property changes after four decades of wastewater irrigation: A landscape perspective. **Catena**, v.73, p.63-74, 2008.

WEILAND, P. Biomass digestion in agriculture: a successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. **Engineering Life Science**, v.6, n.3, p.302–309, 2006.

CAPÍTULO V

Relações hídricas, trocas gasosas e fluorescência da clorofila na cultura do milho irrigado com água residuária em diferentes solos na bacia do Ipojuca-PE

RELAÇÕES HÍDRICAS, TROCAS GASOSAS E FLUORESCÊNCIA DA CLOROFILA NA CULTURA DO MILHO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA EM DIFERENTES SOLOS DA BACIA DO RIO IPOJUCA-PE

RESUMO

O milho tem reconhecida importância socioeconômica no Nordeste do Brasil, porém a falta ou excesso de água limita o seu cultivo. Para tanto, é necessário determinar a quantidade ideal para a obtenção do máximo rendimento. Assim, propôs-se com este trabalho avaliar as relações hídricas, trocas gasosas e fluorescência da clorofila do milho cultivado com diferentes lâminas de irrigação e tipos de solos da Bacia do Rio Ipojuca-PE. O experimento foi conduzido em ambiente protegido, adotando-se o delineamento em blocos casualizados, com cinco lâminas de irrigação (80, 90, 100, 110 e 120% da ETc) e dois tipos de solos (Solo 1 – Planossolo Háplico; Solo 2 – Neossolo Regolitico), mais 02 testemunhas absolutas, com 4 repetições. As variáveis analisadas foram: status hídrico do solo, potencial hídrico foliar, trocas gasosas e fluorescência da clorofila avaliados ao 45 e 60 DAS. A componente osmótica tem grande contribuição para o potencial hídrico ou potencial total do solo da cultivar de milho BR 5026 do IPA, nos estágios de florescimento quando esta é cultivada em ambientes salinos. O potencial hídrico foliar do milho aumentou com os acréscimos das lâminas de irrigação nas duas épocas de avaliação, sendo classificado aos 60 DAS sob estresse hídrico moderado com lâmina de 80% da ETc. Os valores mais expressivos da condutância estomática e transpiração foliar em plantas de milho foram, de forma geral, observados quando se utilizaram lâminas superiores de 100% da ETc. O déficit de pressão de vapor é um indicativo de plantas sob estresse tanto nas lâminas de 80% da ETc quanto 120% da ETc. A fluorescência inicial (F0) mostrou-se mais sensível na detecção do estresse hídrico no tratamento de 90% da ETc quando comparada com a fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), rendimento quântico máximo fotoquímico primário (Fv/Fm) que foram mais sensíveis ao excedente hídrico, que corresponde ao tratamento de 120% da ETc.

Palavras-chave: *Zea mays* L., reposição hídrica, parâmetros fisiológicos.

WATER RELATIONS, GAS EXCHANGES AND CHLOROPHILL FLUORESCENCE IN CORN CROP IRRIGATED WITH RESIDUARY WATER FOR DIFFERENT SOILS OF THE IPOJUCA-PE RIVER BASIN

ABSTRACT

Maize has recognized socioeconomic importance in Northeast Brazil, but the lack or excess of water resources limit its cultivation. For this, it is necessary to assess the optimum quantity to obtain the maximum yield. Thus, it was proposed with this work, to evaluate the water relations, gas exchange and fluorescence of the chlorophyll of maize cultivated with different irrigation slides and soil types of the Ipojuca River Basin-PE. The experiment was conducted in a protected environment, using a randomized block design with five irrigation depths (80, 90, 100, 110 and 120% ETc) and two types of soils (Haplic Planosol - Soil 1 and Entisol - Soil 2), plus 2 absolute controls, with 4 replications. The larger irrigation depths contributed to increase the soil matric potential. Entisol presented higher matrix potentials compared to the Haplic Planosol soil. The osmotic component has a hight contribution to the water potential or total potential of the soil of the BR 5026 maize cultivar from IPA, in the flowering stages when it is cultivated in saline environments. The leaf water potential of maize increased with the increase of irrigation depths in the two evaluation periods, being classified to 60 DAS moderate water stress under 80% ETc depth. Haplic Planossol have greater water availability, favoring the maintenance of soil moisture in relation to the Entisol that have lower water availability, which reflects in the reduction of leaf water potential at 45 DAS. The most significant values of stomatal conductance and leaf transpiration in maize plants were observed when using irrigation depths of 110% of ETc. In turn, decrease of stomatal conductance and leaf transpiration is a response of the water stress were observed for 80% ETc irrigation depth. The vapor pressure deficit is indicative of stress plants for both the 80% ETc and 120% ETc depth. The increase in water use efficiency and intrinsic water use efficiency are indicators of water stress tolerance. The initial fluorescence (F0) was more sensitive in the detection of water stress in the treatment of 90% ETc when compared to the maximum fluorescence (Fm), variable fluorescence (Fv), primary quantum yield (Fv/Fm) were more sensitive to the water surplus that corresponds to the treatment of 120% of ETc.

Key-words: *Zea mays* L., water remediation, physiological parameters.

1.0 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é um cereal pertencente à família Poaceae, de destacada importância econômica no Brasil e no mundo. É extensivamente utilizado como alimento humano ou como ração animal, devido às suas qualidades nutricionais. O dado mais antigo da cultura do milho advém sua origem do México, consumido pelos povos americanos desde 5000 a.C. quando servia de base para alimentação de Maias, Incas e Astecas, que o cultivavam e o utilizavam também na arte e religião (Guimarães, 2007; Fancelli e Dourado, 2000).

O Brasil é o terceiro produtor mundial de milho, perdendo apenas para Estados Unidos e China, atingindo sua maior produção estimada em 94 milhões de toneladas na safra (2018/2019), com uma área plantada de 17,25 milhões de ha. Pernambuco se destaca na região nordeste como sexto produtor de milho, sendo cultivado em quase todas as microrregiões do Estado por pequenos e médios produtores, tanto para produção de grão quanto para silagem, registrando uma produção de 130 mil toneladas e área plantada na safra (2018/2019) aproximada de 217,9 mil ha (CONAB, 2019).

Dentre os fatores que afetam o crescimento, comportamento fisiológico e a produtividade das culturas, pode-se destacar o estresse hídrico como um dos mais impactantes. Diante disto, a água é o fator ambiental mais relevante para o desenvolvimento das plantas, de modo que seu excesso ocasiona sérios prejuízos, podendo afetar a aeração na zona radicular e a lixiviação dos nutrientes, enquanto que sua falta pode inibir o crescimento da planta e afetar o metabolismo fisiológico e, por fim, a produção; com isto, o manejo da irrigação deve ser adequado visando à eficiência no uso da água (Bilibio et al., 2010; Lima et al., 2012).

Quanto às relações hídricas e trocas gasosas, sabe-se que o influxo de CO_2 ocorre necessariamente através dos estômatos no processo fotossintético, ocorrendo também o efluxo de água, por meio da transpiração, sendo o movimento estomático o principal mecanismo de controle das trocas gasosas nas plantas superiores. Desta forma, a disponibilidade hídrica no solo pode causar fechamento estomático, limitando a condutância estomática e a transpiração, o que reduz, consequentemente, a taxa de fotossíntese (Silva et al., 2010).

Em outro aspecto, diversos fatores podem ocasionar mudanças ambientais no aparato fotossintético e seus efeitos podem ser estudados a partir da fluorescência da clorofila. A técnica torna possível avaliar a eficiência fotoquímica do fotossistema II (FSII) por meio de um método simples, rápido, sensível e não destrutivo, utilizado em investigações de danos ou reparos

causados no sistema fotossintético das plantas, em função de diversos tipos de estresse (Silva et al., 2015; Oliveira et al., 2018; Monteiro et al., 2018).

De acordo com Santos et al. (2010), as medidas de trocas gasosas são significativas para determinar as taxas fotossintéticas, porém podem não ser eficientes para avaliar os efeitos deletérios nos cloroplastos; desta maneira e segundo esses autores, a avaliação da fluorescência da clorofila *a* revela o nível de excitação da energia que dirige a fotossíntese e fornece subsídios para estimar a inibição ou o dano no processo de transferência de elétrons do PSII.

É importante enfatizar que os inúmeros mecanismos fisiológicos correlacionados com as condições hídricas das culturas, a temperatura foliar pode ser usada como um indicador relevante do grau de déficit hídrico na planta. A transpiração é o principal mecanismo envolvido na regulação da temperatura foliar devido às menores aberturas estomáticas e, por consequência, ocorrem redução da transpiração foliar e aumento da temperatura da folha, por consequência da diminuição da dissipação do calor latente, informando que a capacidade de refrigeração das plantas reduz via transpiração (Kumar e Portis Júnior, 2009).

Apesar da reconhecida importância do cultivo do milho, os relatos disponíveis na literatura referentes a mecanismos fisiológicos de resposta à disponibilidade hídrica nesta cultura são ainda escassos; principalmente pelos aspectos fisiológicos e de desenvolvimento da planta que são relacionado ao estado hídrico da planta, influenciando diretamente a produção, sendo necessário estudos nessa área.

Com base no exposto objetivou-se, com este trabalho, avaliar as relações hídricas, trocas gasosas e fluorescência da clorofila do milho cultivado com diferentes lâminas de irrigação e tipos de solos da Bacia do Rio Ipojuca -PE.

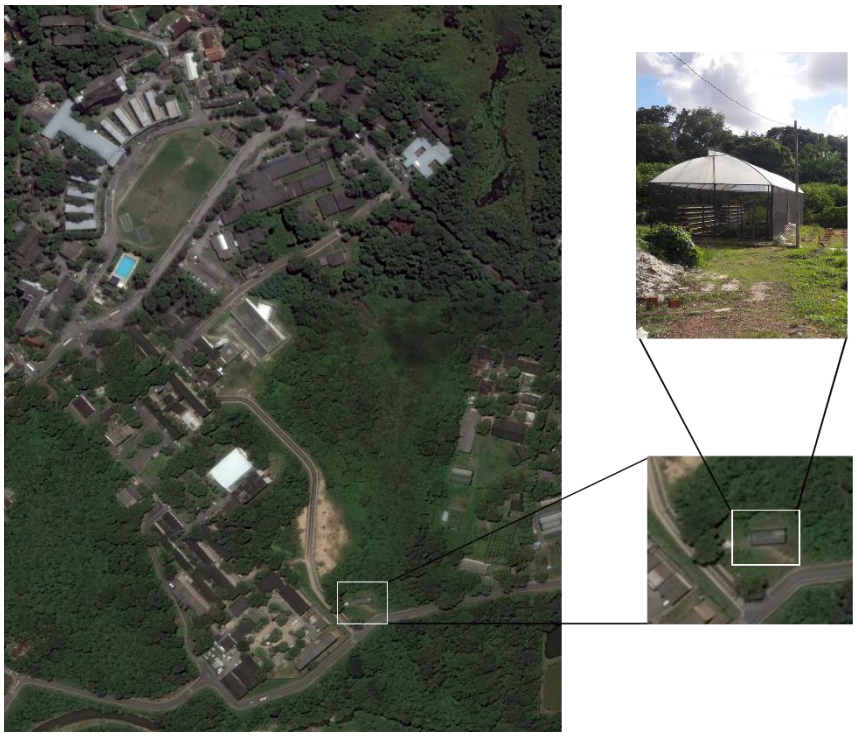
2.0 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do ambiente experimental

O experimento foi desenvolvido em condições de casa de vegetação da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Campus Recife, sob as seguintes coordenadas geográficas: 08º 01’ 07’’ S e 34º 56’ 53’’ W, e altitude de 6,5 m, de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum) (Figura 1), durante os meses de Dezembro de 2018 a Fevereiro de 2019, com a cultura do milho até os 80 dias após a semeadura (DAS).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média é de 2.263,5 mm ano^{-1} concentrada, principalmente, entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 377,9 mm no mês de mais chuvoso (junho); as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média 79,8%, insolação 2550,7 horas. O total de evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 e 1.600 mm ano^{-1} (Barros, 2019; INMET, 2019).

Figura 1. Localização da casa de vegetação-UFRPE.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 Caracterização experimental

A área experimental foi composta por 48 recepientes plásticos com capacidade de 60 L, diâmetro externo na borda superior 0,40 m e altura externa de 0,55 m.

Para preenchimento interno dos recepientes foi colocada uma camada de 2 cm de brita nº1 em cada vaso, a fim de encobrir o dreno e facilitar a drenagem. Após o preenchimento com brita foi colocada sobre a mesma manta geotêxtil, com finalidade de filtro, para evitar a passagem de partículas de solo para a camada inferior. Após a colocação da manta geotêxtil, os sistemas foram preenchidos com 64 kg de solo seco (Planossolo Háplico – Solo 1); 67,21 kg de

solo seco (Neossolo Regolítico – Solo 2), por fim sendo alocado em tijolos afim de nivelar a área experimental.

O sistema de drenagem teve na parte inferior de cada vaso um conector de 16 mm adaptado a uma mangueira plástica transparente, direcionando o efluente drenado a uma garrafa PET de 2,0 L, para coleta da solução drenada.

Os solos que foram utilizados são representativos da Bacia do Rio Ipojuca-PE e seus atributos físico-químicos estão dispostos nas Tabelas 1 e 2 (Embrapa, 2017).

Tabela 1. Características físico-química do solo 1 (Planossolo Háplico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

Solo 1		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
		g Kg^{-1}				g cm^{-3}		%	%		
		711	117	56	116	1,43	2,69	46,84	9,6	4,58	Areia Franca
pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}						%	mg Kg^{-1}	g Kg^{-1}	
7	1,39	2,3	1,6	0	0	0,52	0,49	10,59	109	8,5	4,14

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

Tabela 2. Características físico-química do solo 2 (Neossolo Regolítico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

Solo 2		Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
		g Kg^{-1}				g cm^{-3}		%	%		
		700	117	47	76	1,60	2,52	51,2	8,3	4,30	Areia Franca
pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	$cmol_c$ dm^{-3}						%	mg Kg^{-1}	g Kg^{-1}	
7	0,54	1,1	1,0	0	0	0,38	0,26	13,86	9	0,9	1,55

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial (5 x 2) + 2, com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais.

Os tratamentos consistiram em cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (ETc): (80, 90, 100, 110 e 120%) de esgoto doméstico tratado proveniente de Mutuca, distrito do município de Pesqueira-PE, 02 tipos de solos (Planossolo Háplico – Solo 1; Neossolo Regolítico – Solo 2; mais 02 testemunhas. As testemunhas consistiram da irrigação com água de abastecimento com lâmina correspondente a 100% da ETc para o solo 1 e 2. A água de abastecimento foi proveniente de Poço do CEGOE/UFRPE.

2.4 Dimensionamento das águas utilizadas e manejo de irrigação

O efluente líquido tratado foi proveniente da Estação de Tratamento de Reúso e Manejo Hidroagrícola, localizada no Distrito de Mutuca, pertencente à cidade de Pesqueira-PE. Para a coleta da água residuária foi utilizado uma tubulação de PVC, oriunda diretamente da lagoa de polimento e com utilização de uma Motobomba Schneider BC-92, de 1,5 CV. Essa tubulação conduziu o efluente até o reservatório com capacidade de 1000 litros, onde foi acondicionado.

O efluente foi armazenado em uma caixa de água de 3000 L. Para o tratamento testemunha, foi utilizado um reservatório de 100 L com água de abastecimento.

A determinação da composição físico-química da água residuária e água de abastecimento (Tabela 3) foi realizada pela Agrolab Análises Ambientais e na Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA, respectivamente. Os parâmetros físico-químicos foram determinados de acordo com a metodologia proposta por APHA (1995).

Tabela 3. Caracterização físico-química da água de abastecimento e da água residuária utilizado no experimento.

Constituintes	Unidade	AB	AR
pH		6,30	8,30
CE	dS m^{-1}	0,13	5,70
STD	µS cm^{-1}	-	2869,0
N-Total	mg L^{-1}	-	23,6
P -Total	mg L^{-1}	-	2,0
K^{+}	mg L^{-1}	2,50	85,8
Ca^{2+}	mg L^{-1}	0,90	34,5
Mg^{2+}	mg L^{-1}	0,60	50,9
Na^{+}	mg L^{-1}	5,40	782,0
Nitrato	mg L^{-1}	0,02	42,4
Cloretos	mg L^{-1}	15,40	950,0
Sulfato	mg L^{-1}	-	103,7
Bicarbonato	mg L^{-1}	-	647,2

O critério adotado na definição das lâminas de irrigação com efluente doméstico tratado (aplicadas manualmente) na implantação dos tratamentos baseou-se no sistema de drenagem dos tratamentos com 100% da ETc (Equação 1). A frequência da aplicação do efluente doméstico foi com turno de rega de dois dias.

$$I = (La - Ld) + 10\% \quad (1)$$

Em que: I – Irrigação aplicada (L); La – lâmina aplicada (L); Ld – lâmina drenada (L).

A lâmina foi aplicada com base no consumo diário (La-Ld) observado, somado a 10% deste, garantindo a drenagem. A esta lâmina foi somada ao percentual de lâmina de irrigação correspondente a cada tratamento em ambos os tipos de solos.

Para o critério da lâmina de irrigação nas plantas irrigadas com água de abastecimento (Testemunhas) baseou-se na evapotranspiração da cultura, onde foram distribuídos três vasos preenchidos com solo 1 – Planossolo Háplico e três vasos preenchidos com solo 2 – Neossolo Regolítico, totalizando seis vasos (lisímetros) adicionais entre os demais. Todos também semeados com milho, cv. BR 5026 IPA no mesmo dia dos demais. Assim, os solos foram colocados na capacidade de campo, evitando variação na água drenada e, em seguida, foi estimada a evapotranspiração da cultura (ETc), conforme Aboukhaled et al. (1982) (Equação 2):

$$ET_C = P + I - D/A \quad (2)$$

Em que: ETc - Evapotranspiração da cultura (mm); P - Precipitação pluviométrica (mm); I - Lâmina de água aplica por irrigação (mm); D - Água drenada do lisímetro (mm); A – Área do lisímetro (m^2). Como o cultivo foi em ambiente protegido, a precipitação é igual a zero.

2.5 Descrição e implementação das culturas

A semeadura do milho foi realizada manualmente a 5 cm de profundidade, usando-se 5 sementes $vaso^{-1}$, logo após foi realizado o desbaste, restando apenas 1 planta $vaso^{-1}$. Utilizou-se a cultivar BR 5026 do IPA (São José). A cultivar foi semeada no espaçamento de 0,7 m entre linhas e 0,30 m entre plantas.

Para suprir as necessidades nutricionais da cultura foi realizada adubação segundo o Manual de Recomendação de Adubação do Instituto Agronômico de Pernambuco (Cavalcanti et al., 2008). A adubação mineral convencional consistiu em 90 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 20 kg ha^{-1} de K_2O. O nitrogênio foi parcelado, com a aplicação de 30 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia, por ocasião da emergência, e o restante (60 kg ha^{-1}) com 40 dias após a semeadura (DAS).

2.6 Determinação do status hídrico do solo

O potencial total da água no solo (Ψt) foi determinado aos 60 DAS, durante a madrugada foi coletada uma amostra de solo para determinação da umidade e estimou-se o potencial mátrico, utilizando a curva de retenção de água no solo.

O potencial osmótico de um solo pode ser estimado por meios da Condutividade Elétrica (CE), a partir da Equação 3, Gheyi et al (2016):

$$\Psi_O = -36 \times CE \quad (3)$$

Em que: Ψ_O - potencial osmótico, kPa; CE - condutividade elétrica, dS m^{-1}.

Assim, o potencial total com que a água é retida em um solo salino, pode ser expresso pela Equação 4:

$$\Psi_T = \Psi m + \Psi o + \Psi g \quad (4)$$

Em que: Ψ_T - potencial total de água no solo, kPa; Ψm - potencial matricial do solo, kPa; e Ψ_O - potencial osmótico da solução do solo, kPa; Ψg – potencial gravitacional do solo, KPa.

2.7 Determinação das trocas gasosas, potencial hídrico e fluorescência

Aos 45 dias após a semeadura (DAS) foram determinadas a transpiração (E), condutância estomática (gs), o déficit de pressão de vapor (DVPfolha-ar), eficiência de uso da água A/E (EUA), eficiência intrínseca de uso da água calculado por A/gs (EIUA) utilizando-se o Infra Red Gas Analyzer (IRGA Modelo LICOR XT6400).

A medição do potencial hídrico das plantas foi realizada aos 45 e 60 DAS na madrugada, das 3:00 às 4:00 horas, onde se esperou atingir um equilíbrio entre os potenciais da planta e do solo.

Foi coletada uma folha sadia do terço médio da planta. Depois de coletada, a folha foi envolvida em filme plástico e refrigerada em caixa de isopor contendo gelo, onde ficaram armazenadas até a hora da leitura, para diminuir as perdas por transpiração. O potencial hídrico (Ψ_t) da planta foi medido diretamente através da utilização de câmara de pressão de Scholander, modelo 1515D Pressure Chamber Instrument - PMS Instrument Company.

A fluorescência da clorofila foi avaliada com o auxílio do fluorômetro FluorPen, modelo F100 (Photon Systems Instruments), a cada 45 e 60 dias após a semeadura (DAS), das 10:00 às

13:00 h. As medições foram feitas nas folhas +3 no terço médio, sadias, completamente expandidas e adaptadas ao escuro, por 30 minutos, com o auxílio de pinças.

A partir das intensidades de fluorescência medidas, foram calculados os parâmetros estabelecidos pelo Teste - JIP e Derivações do Test – JIP, obtidas das análises da fluorescência da clorofila *a* de acordo com Strasser et al. (2004), Yusuf et al. (2010) e Redillas et al. (2011).

Os parâmetros avaliados foram: fluorescência inicial (F0), fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv) e Rendimento quântico do PSII (Fv/Fm).

2.8 Variáveis fisiológicas vs Altura de planta

Foi realizada a relação entre as variáveis fisiológicas e altura de planta para acompanhar os efeitos dos tratamentos aos 45 e 60 DAS.

2.9 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F utilizando-se o software estatístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2011), com nível de significância de 0,05 de probabilidade para o teste de média, regressão e contraste dos dados.

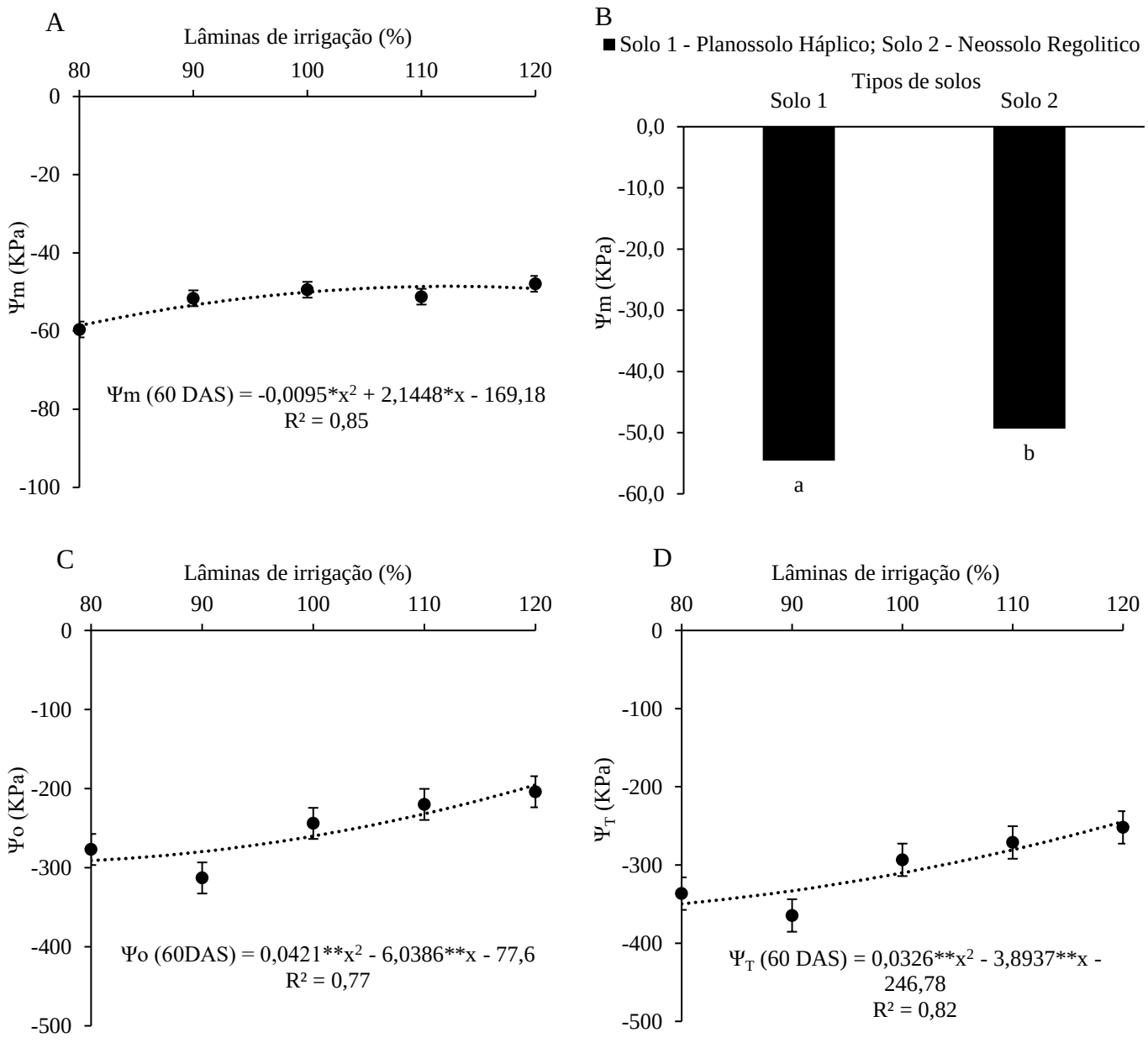
Os contrastes ortogonais foram realizados com as testemunhas *vs* água residuária que corresponde: 100% de água de abastecimento *vs* 100% de água residuária, nos dois solos analisados.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Potenciais do solo na madrugada (Ψ_t)

Devido à manutenção da umidade do solo ao longo do experimento e entre os tratamentos, a maior contribuição para o potencial total foi devido ao potencial osmótico (Figura 1).

Figura 1. Potencial mátrico (A; B), osmótico (C) e total do solo (D) com seu erro padrão em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solo aos 60 DAS, determinado na madrugada. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos pelo teste de Tukey ($p< 0,05$).



Na Figura 1A, observa-se diferença significativa do potencial matricial a ($p<0,05$) em função das lâminas de reposição da ETc. Aos 60 DAS o potencial matricial aumentou cerca de 17,60%, passando de -58,40 KPa na lâmina de irrigação de 80% da ETc para -48,12 KPa na lâmina máxima estimada de 111,88% da ETc, indicando maior disponibilidade de água no solo

neste tratamento. Resultados semelhantes foram encontrados por Blanco e Folegatti (2002), onde perceberam o aumento do potencial matricial com a disponibilidade hídrica.

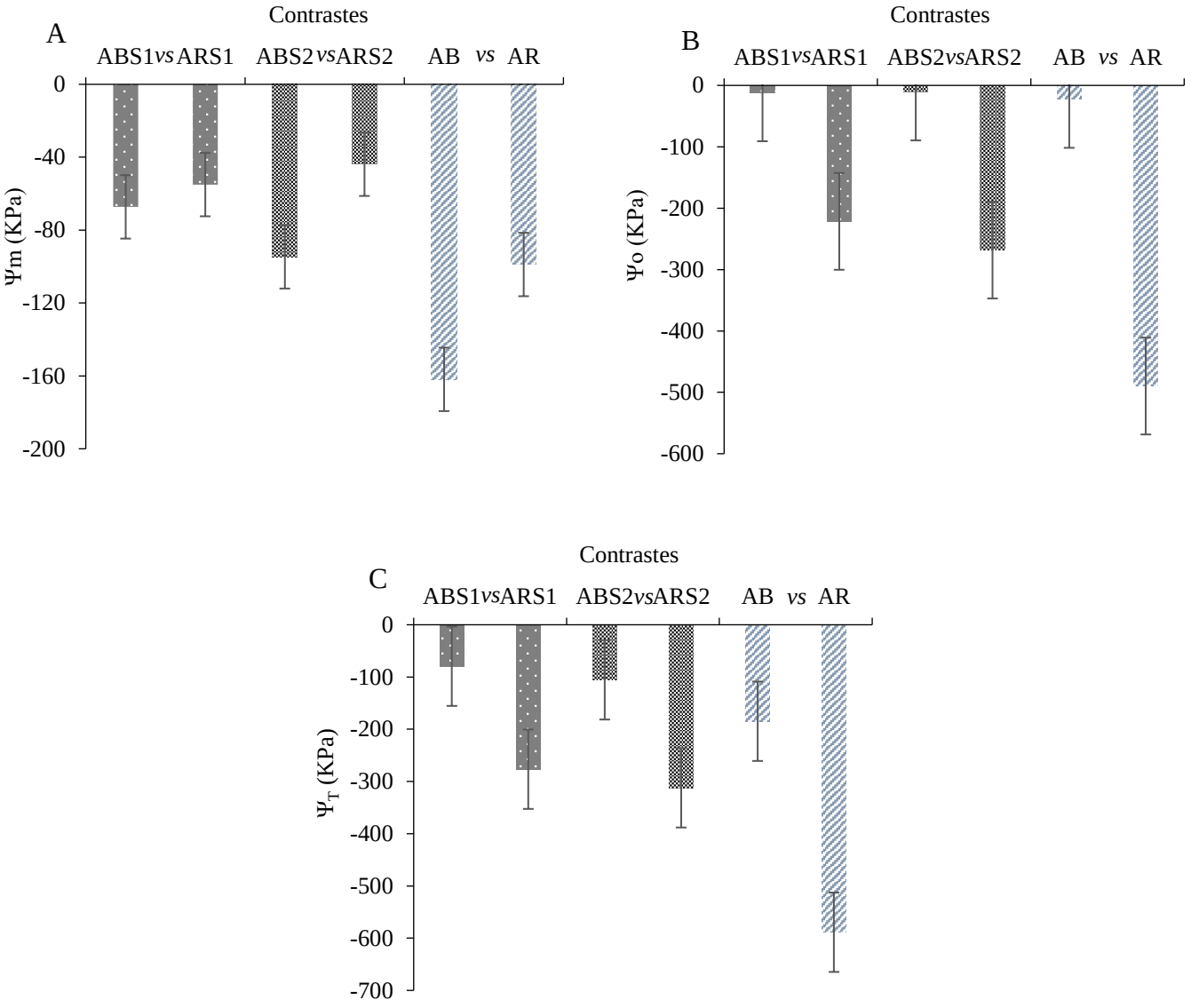
Quanto ao efeito dos tipos de solos, observa-se na Figura 1B que o Solo 1 foi o que proporcionou menor potencial matricial, da ordem de -54,56 KPa, com incremento de 9,54% em relação ao Solo 2 que apresentou -49,35 KPa.

Verifica-se na Figura 1C diferença significativa do potencial osmótico ($p<0,01$) em função das lâminas de reposição da ETc, onde se observa que a disponibilidade de água residuária no solo favorece o aumento do potencial osmótico da solução do solo e, consequentemente, o potencial hídrico ou total do solo, apresentando valor máximo estimado de -291,25 KPa na lâmina de 80% da ETc e -195,99 kPa na lâmina de 120% da ETc, com acréscimo de 32,70%. Vale ressaltar que a CEes na lâmina de 80% da ETc atingiu valor de 6,28 dS m^{-1} e na lâmina de 120% da ETc 5,35 dS m^{-1}, ao fim do ciclo da cultura, justificando o efeito do potencial osmótico na lâmina sob déficit hídrico.

Em relação ao potencial total do solo (Figura 1D), este também apresentou diferença significativa ($p<0,01$) em função das lâminas de reposição da ETc. O potencial total do solo aumentou cerca de 30,04%, com máximo estimado de -349,64 KPa na lâmina de irrigação de 80% da ETc e -244,58 KPa na lâmina de 120% da ETc.

O uso de água de abastecimento teve efeito significativo para o potencial matricial do solo quando comparado com água residuária ($p<0,01$) (Figura 2A).

Figura 2. Teste de contraste para potencial mátrico (A), osmótico (B) e total (C) do solo na cultura do milho irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR) aos 45 DAS. (**) Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste F.



Observa-se em todos os contrastes que o potencial matricial do solo quando irrigado com água de abastecimento atingiu maiores valores que quando irrigado com água residuária, da ordem de -67,25 KPa e -55,02 KPa (ABS1 vs ARS1); -94,66 KPa e -43,85 KPa (ABS2 vs ARS2); -161,91 KPa e -98,87 KPa (AB vs AR), representando decréscimos de 18,18%, 53,67%, 38,93%, respectivamente.

Em relação ao potencial osmótico (Figura 2B), também se observa diferença significativa a ($p<0,01$) em função dos diferentes tipos de águas. Analisando todos os contrastes, verifica-se que potencial osmótico apresentou menores valores quando irrigado com água de abastecimento que com água residuária, da ordem -12,08 KPa e -221,50 KPa (ABS1 vs ARS1); -10,76 KPa e -268,28 KPa (ABS2 vs ARS2); -22,84 KPa e -489,78 KPa (AB vs AR), ocasionando reduções de 94,54%, 95,98%, 95,33% respectivamente. Este fato pode ser explicado devido à água residuária possuir maiores concentrações de sais e com isso favorece para aumento do potencial osmótico nos solos.

Como a maior contribuição para variação do potencial total é do potencial osmótico, resultados semelhantes são encontrados na Figura 2C. Verifica-se que o potencial total apresentou diferença significativa a ($p<0,01$) em função dos tipos de águas, onde se percebe maiores potencias totais quando irrigado com água residuária em comparação com água de abastecimento, representando valores de -79,33 KPa e -276,52 KPa (ABS1 vs ARS1); -105,42 KPa e -312,14 KPa (ABS2 vs ARS2); -184,75 KPa e -588,66 KPa (AB vs AR), ocasionando reduções de 71,31%, 66,22% e 68,61%, respectivamente.

3.2 Potencial hídrico da planta na madrugada (Ψ_w)

Observa-se na Figura 3A uma relação linear entre o potencial hídrico foliar em função das lâminas de irrigação a ($p<0,01$) aos 45 DAS. A lâmina de 80% da ETc apresentou um valor mínimo estimado de -0,74 MPa, representando acréscimo de 45,94% em relação a lâmina máxima estimada de 120% da ETc, que apresentou -0,40 MPa. Com o aumento das lâminas de irrigação, houve também aumento do potencial total do solo, devido ao maior conteúdo de água no solo. Para lâminas sob déficit hídrico, esses potenciais menores exigem que a planta diminua também seu potencial para que possa absorver água. A mesma tendência foi observada por Santos et al., (2017), Santos et al., (2014) e Bastos et al., (2012), com diferentes culturas.

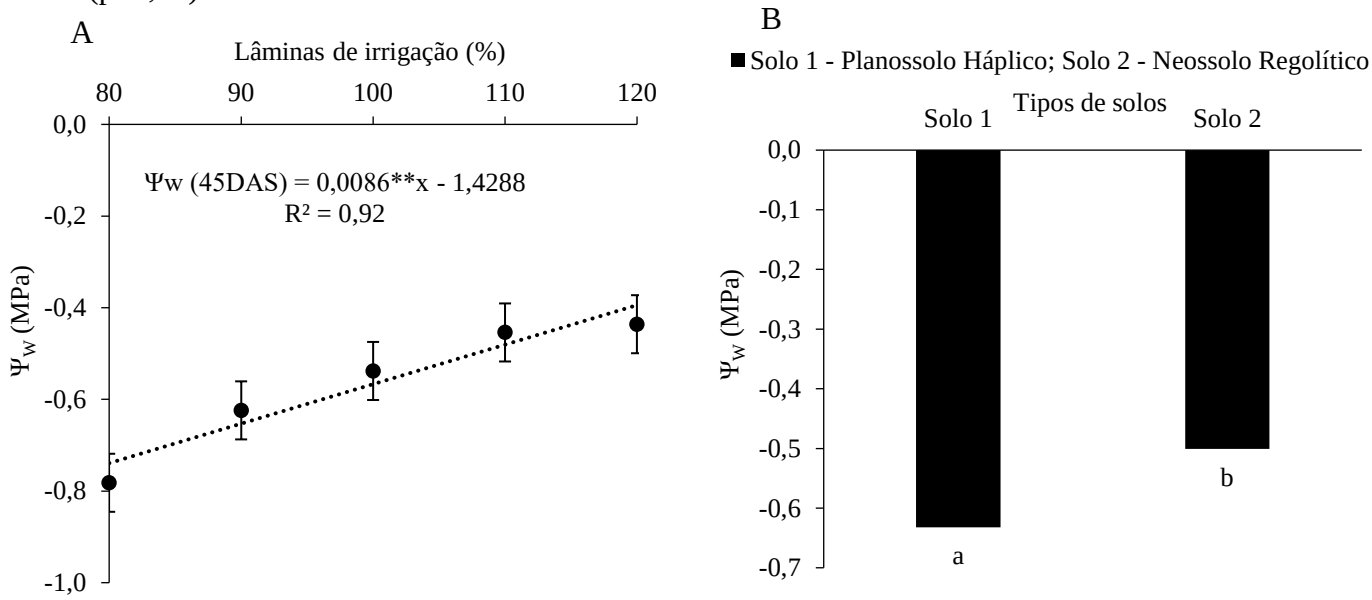
De acordo com Taiz e Zeiger (2017), quanto menor a quantidade de água no solo mais negativo deve ser o potencial desenvolvido pelas culturas, formando um gradiente que favoreça à absorção de água pelas plantas.

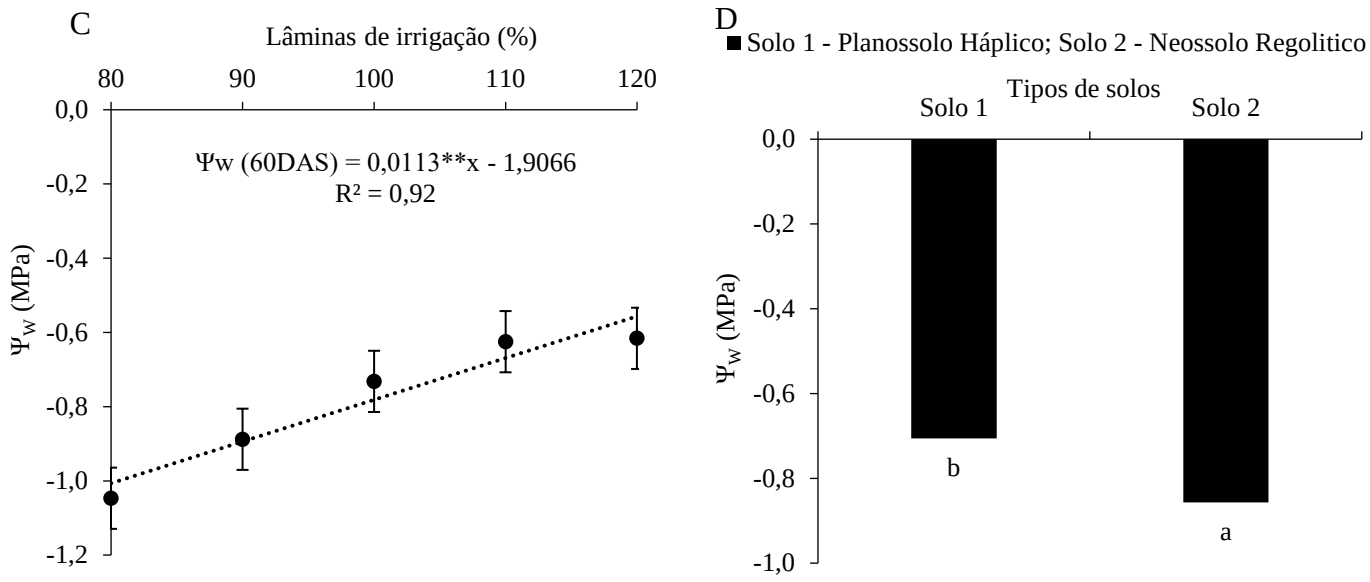
Outro aspecto a ser considerado é a concentração de sais na composição da água de irrigação, contribuindo para diminuição do potencial hídrico na planta em particular sob as plantas irrigadas sob déficit hídrico, de 80% e 90% da ETc. Segundo Chen e Jiang (2010), os solutos dissolvidos na zona das raízes geram um potencial osmótico mais baixo, o que diminui

o potencial total do solo. Isso acaba influenciando o potencial hídrico da planta. Para que se forme um continuum solo-planta-atmosfera, os potenciais hídricos devem decrescer neste sentido.

Em relação ao efeito isolado dos tipos de solo (Figura 3B), observa-se diferença significativa ($p<0,05$). Aos 45 DAS, as plantas de milho apresentaram menor potencial hídrico no Solo 1 quando comparado ao Solo 2, apresentando valores de -0,63 MPa e -0,50 MPa respectivamente, tendo um acréscimo de 20,63% em relação ao Solo 2, apresentando uma melhor disponibilidade de água.

Figura 3. Potencial hídrico na folha do milho com seu erro padrão em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solo aos 45 (A; B) e 60 (C; D) DAS determinado na madrugada. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos pelo teste de Tukey ($p<0,05$).





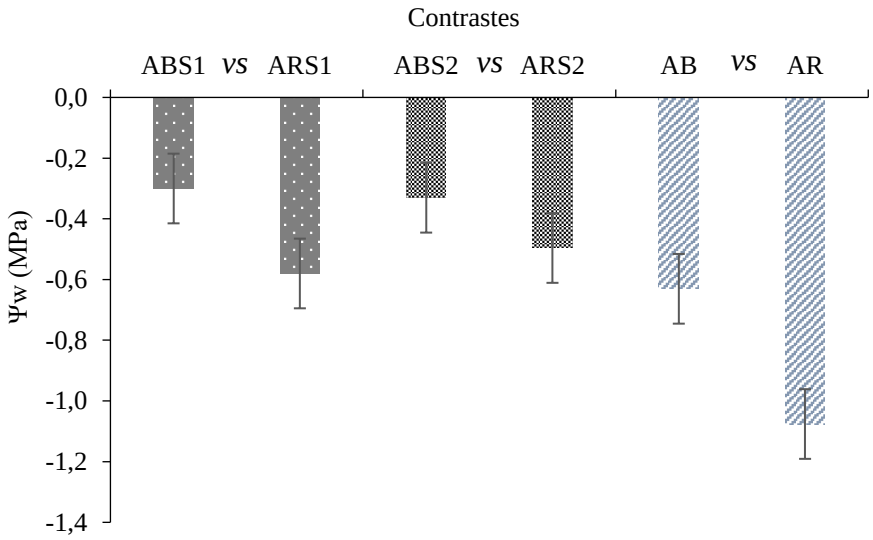
Observa-se na Figura 3C comportamento linear do potencial hídrico foliar aos 60 DAS a $p<0,05$, em função das lâminas de irrigação. O potencial hídrico foliar na lâmina de irrigação de 80% da ETc atingiu valor mínimo estimado de -1,00 MPa, com acréscimo de 45% em comparação à lâmina máxima estimada de 120% da ETc que apresentou -0,55 MPa. Segundo Taiz e Zeiger (2017), plantas que apresentam potencial hídrico entre -1,0 MPa a -2,0 MPa são consideradas plantas sob estresse hídrico moderado. Aspecto de estresse hídrico e salino no tratamento de 80% da ETc contribuíram para apresentarem menores potenciais hídricos na planta.

Na Figura 3D observa-se a diferença significativa dos potenciais do milho em função dos tipos de solos ($p<0,05$) aos 60 DAS. As plantas de milho apresentaram menor potencial hídrico no Solo 2 quando comparado ao Solo 1, apresentando valores de -0,85 MPa e -0,70 MPa respectivamente, correspondendo a um acréscimo de 17,64% em relação ao Solo 1, que por sua vez apresentou maior disponibilidade de água.

Analisando os contrastes na Figura 4, observa-se que uso de água residuária teve efeito significativo para o potencial hídrico foliar quando comparado com água de abastecimento ($p<0,01$). As plantas de milho, quando irrigadas com água residuária, apresentaram menores potenciais hídricos em ambos tipos de solos, contrastando com as irrigadas com água de abastecimento que apresentaram maiores valores da ordem de -0,30 KPa e -0,58 KPa (ABS1 vs ARS1); -0,33 KPa e -0,49 KPa (ABS2 vs ARS2); -0,63 KPa e -1,07 KPa (AB vs AR), ocasionando aumentos de 48,27%, 32,65%, 41,12% respectivamente.

Ressalta-se que a água residuária tem elevada concentrações de sais, o que contribui para aumentar o potencial osmótico, influenciando no potencial hídrico das plantas. Um dos mecanismos usados pela planta para que isso ocorra é a osmorregulação, que se caracteriza pela acumulação de sais e solutos orgânicos nas folhas, ou seja, o potencial osmótico da célula se altera para manter o gradiente de potencial total entre a folha e o solo (Meloni et al., 2004; Mudgal, et al., 2010).

Figura 4. Teste de contraste para potencial hídrico na folha do milho irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR), aos 45 DAS. (**) Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste F



3.3 Potencial hídrico e parâmetro de crescimento da planta

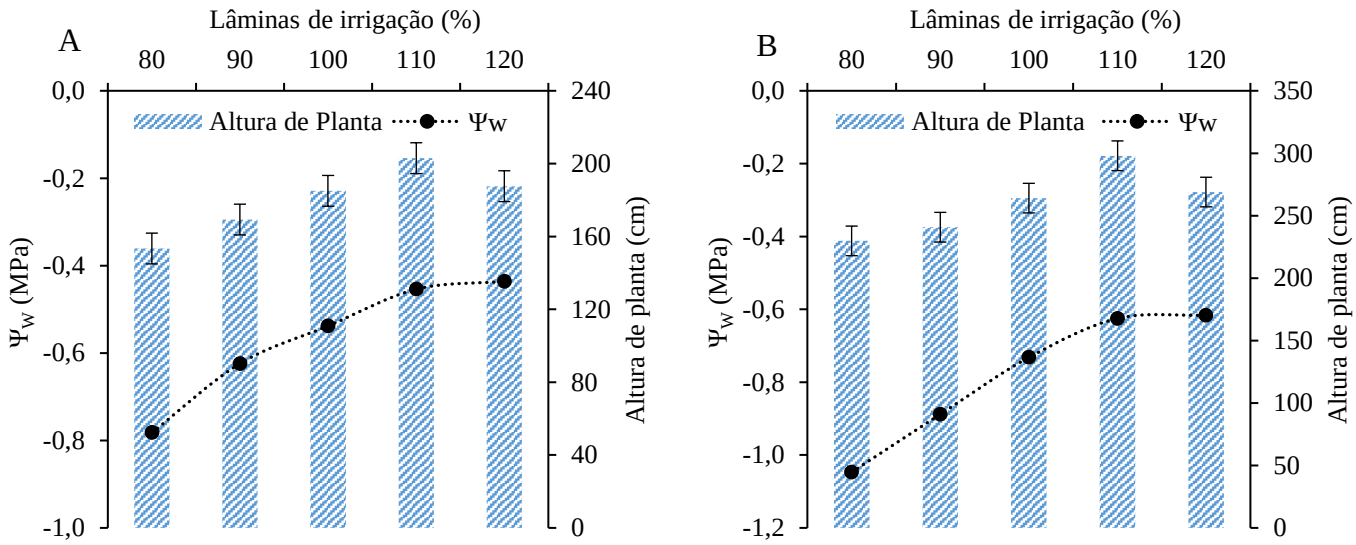
O comportamento de crescimento de uma planta sob estresse indica o que está acontecendo em sua fisiologia. A altura da planta aos 45 DAS reflete o aumento do potencial hídrico do solo com aumento das lâminas de irrigação sob o crescimento do milho (Figura 5A).

As 45 DAS, já podem ser observadas diferenças significativas entre os tratamentos a ($p<0,01$). As plantas do tratamento de 110% da ETc foram as que menos sofreram com o estresse hídrico, aumentando 32,33% em relação à lâmina de 80% da ETc na sua altura.

Quanto menor o potencial da água na planta, maior o seu efeito sobre a altura. Com a diminuição do potencial hídrico a planta tem mais dificuldade para absorver água e nutrientes, impedindo que a planta se desenvolva normalmente. Plantas sob déficit hídrico reduzem a

turgecência celular (Taiz e Zeiger, 2017) e a produção de etileno, o que resulta em uma menor expansão da célula e, consequentemente, na redução do crescimento.

Figura 5. Potencial hídrico foliar e altura de planta do milho, em função de diferentes lâminas de reposição da ETc aos 45 (A) 60 (B) DAS, respectivamente.



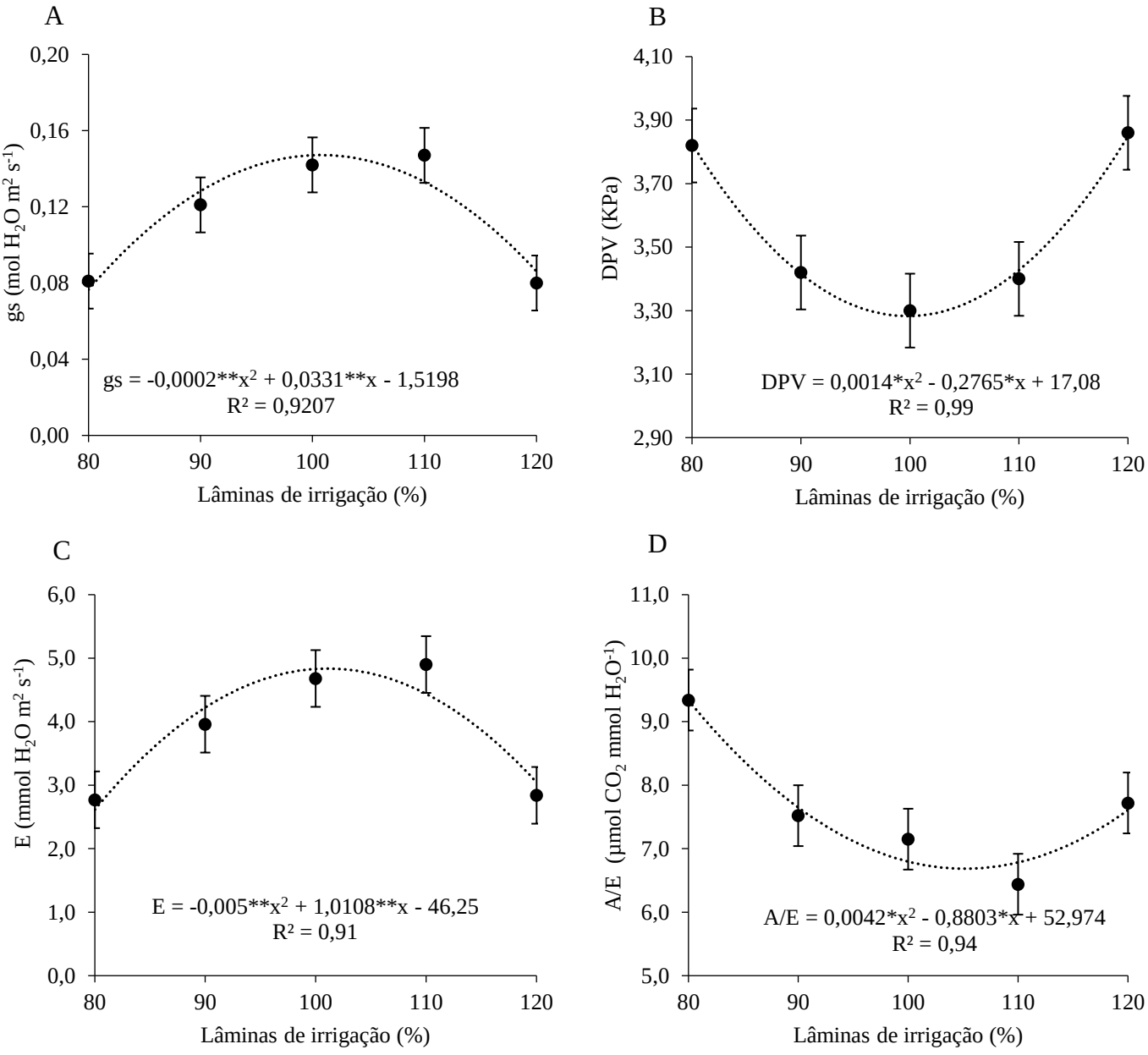
Verifica-se na Figura 5B diferença significativa do potencial hídrico foliar do milho em função das lâminas de irrigação aos 60 DAS ($p<0,01$). São encontrados resultados semelhantes ao comportamento em altura de planta aos que ocorreram aos 45 DAS. Observa-se que as plantas irrigadas com lâminas de 110% da ETc foram as que sofreram menos com estresse hídrico, medindo 297,98 cm. As plantas irrigadas com 80% da ETc foram as que mais sofreram com estresse hídrico, apresentando redução de 22,87% em sua altura quando comparada com 110% da ETc.

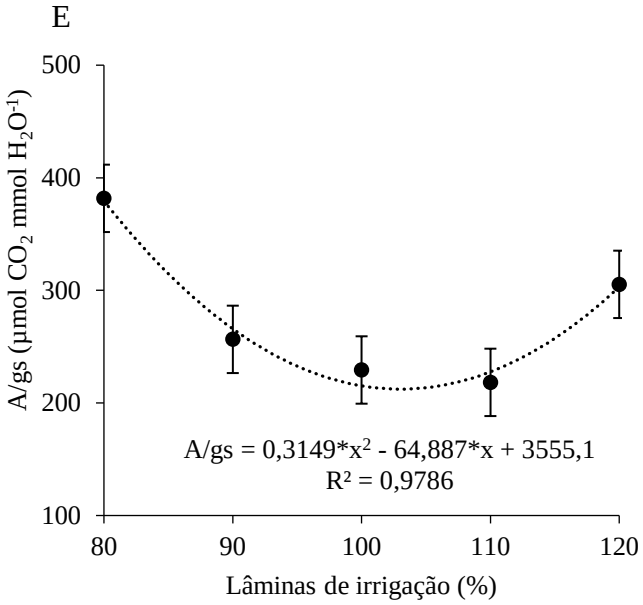
3.4 Trocas gasosas

Para a condutância estomática (gs), percebeu-se efeito significativo dos tratamentos aplicados ($p<0,01$), observando-se ajuste quadrático com aumento da reposição de ETc, com valor mínimo de 0,076 mol de H_2O m^{-2} s^{-1}, obtido na lâmina de 80% da ETc, e valor máximo estimado 0,147 mol de H_2O m^{-2} s^{-1}, obtido na lâmina de 100% da ETc representando aumento de 93,42% (Figura 6A). Neste caso, a maior disponibilidade de água proporcionou maior abertura estomática, dando condições para a planta realizar o processo fisiológico, sem que haja influência negativa na abertura estomática.

Esses resultados mostram que, sob estresse hídrico, uma das primeiras respostas do milho pode ser o fechamento estomático, de forma a minimizar a perda de água (Larcher, 2004; Taiz e Zeiger, 2017).

Figura 6. Condutância estomática (gs) (A) Déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar (DPV) (B) Transpiração (E) (C) Eficiência do uso da água (A/E) (D) e Eficiência intrínseca do uso da água (A/gs) (E) e seus respectivos erros padrão em plantas de milho em função das lâminas de reposição da ETc aos 45 DAS.





Ao se analisar o déficit de pressão de vapor (DPV), constatou-se também efeito quadrático em função das lâminas de reposição da ETc ($p<0,05$) (Figura 6B). O DPV apresentou mínimo estimado de 3,42 KPa na lâmina de 98,75% da ETc, apresentando um incremento de 18,71% em relação à lâmina de 120% da ETc que apresentou 4,06 KPa.

O déficit de pressão de vapor representa a diferença entre as pressões parciais de vapor no ar na saturação e dentro da câmara estomática no momento da medição. Quanto maior o valor do déficit de pressão de vapor, maior o gradiente de energia potencial da água entre o ar e a folha. Os estômatos geralmente fecham quando o déficit de pressão de vapor entre a folha e o ar aumenta, ocasionando a diminuição da condutância estomática (Azizian e Sepaskhah, 2014). De acordo com os resultados encontrados lâmina de água sob estresse hídrico e excedente hídrico comprometeram o DPV na folha, influenciando na abertura dos estômatos.

Na Figura 6C nota-se comportamento quadrático para a transpiração (E) em função das lâminas de reposição da ETc, encontrando-se valor máximo de 4,84 mmol de H_2O m^{-2} s^{-1} na lâmina estimada de 101,08% da ETc, apresentando um acréscimo de 85% em relação à lâmina de 80% da ETc. Tendência semelhante foi observado para a condutância estomática, o que corrobora com informações de Sampaio et al. (2014), que relatam que o comportamento estomático determina a demanda transpirativa a que as folhas estão potencialmente sujeitas, controlando sua perda de H_2O, e mantendo sua pressão de turgor celular.

Para eficiência instantânea do uso da água (A/E), que relaciona a quantidade de CO_2 fixado em função da quantidade de água perdida pela planta, houve diferença significativa

($p<0,05$) em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 6D). A A/E apresentou maior valor estimado na lâmina de 80% da ETc, atingindo valor de 9,43 µmol CO_2 mmol H_2O^{-1} e mínimo estimado de 6,84 µmol CO_2 mmol H_2O^{-1} na lâmina de 104,80% da ETc, com decréscimo de 27,46%. Salienta-se que quanto menor a disponibilidade de água menor também será o grau de abertura estomática, para reduzir a perda d'água; consequentemente, a eficiência do uso da água é maior mantendo-se o mínimo de equilíbrio hídrico.

Resultados semelhantes foram encontrados por diversos autores, em diferentes culturas (Suassuna et al. 2011; Brito et al. 2013; Silva et al. 2015; Souza et al. 2016) que verificaram decréscimo na eficiência instantânea do uso da água com o aumento da lâmina de irrigação.

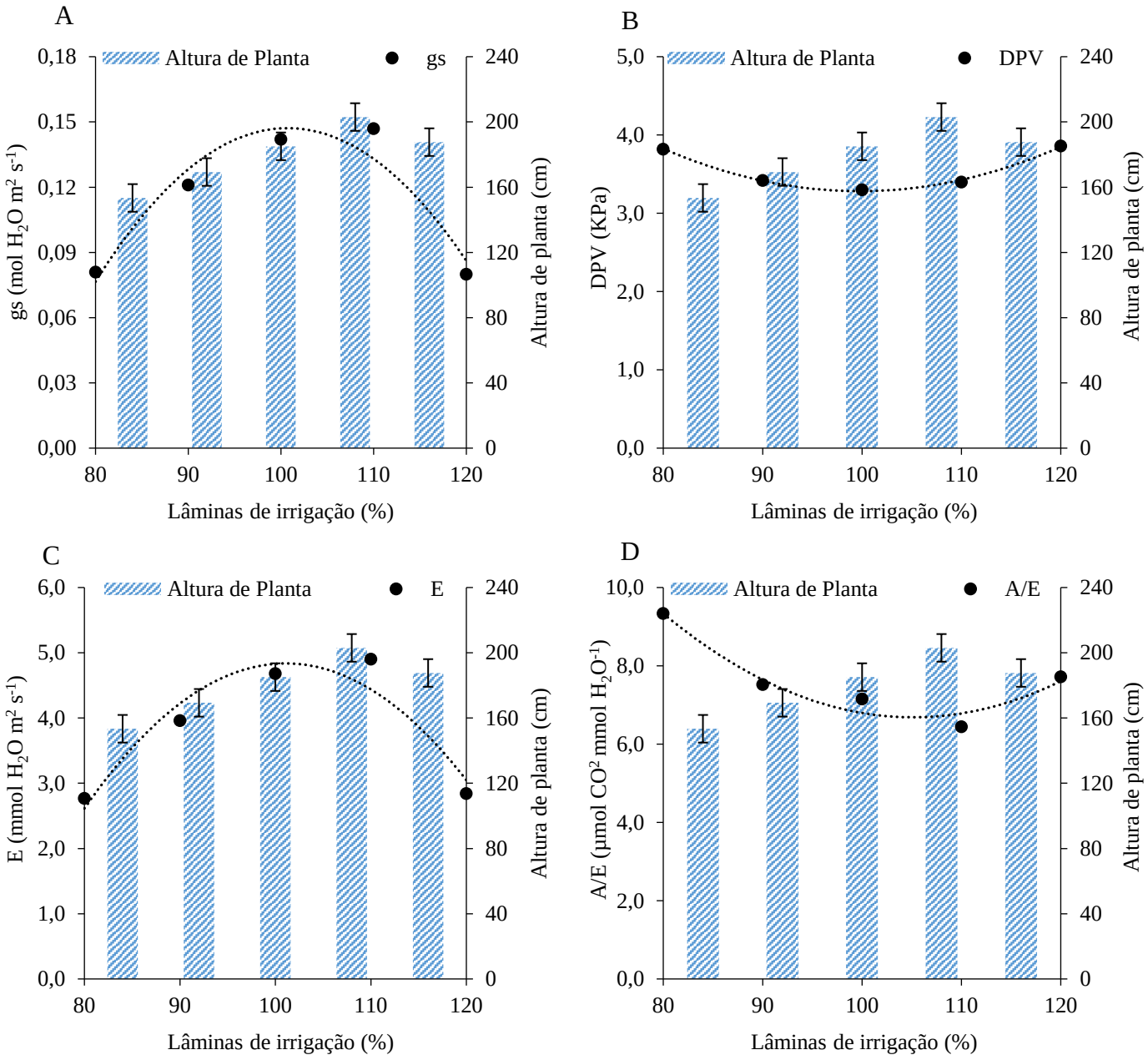
Na Figura 6E observa-se efeito quadrático para eficiência intrínseca do uso da água (A/gs), que relaciona a quantidade de CO_2 fixado com a condutância estomática ao nível de ($p<0,05$) em função das lâminas de reposição da ETc. O milho, quando irrigado com a lâmina de 80% da ETc, apresentou valor máximo de A/gs, correspondente a 379,50 µmol CO_2 mmol H_2O^{-1}, correspondendo a um decréscimo de 44,00% na lâmina de 103,03% da ETc, com mínimo de 212,51 50 µmol CO_2 mmol H_2O^{-1}.

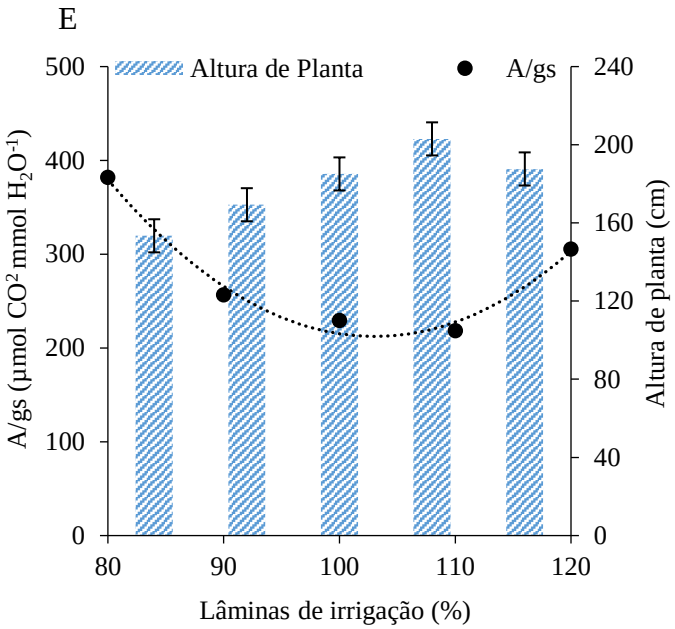
3.5 Trocas gasosas e parâmetro de crescimento da planta

A relação entre condutância estomática (gs) e altura da planta aos 45 DAS indica que o tratamento de 80% da ETc atingiu uma menor condutância estomática sob a altura de 153,40 cm, com acréscimo de 32,33% quando comparado ao tratamento de 110% da ETc, que alcançou maior valor de condutância estomática sob altura de planta de 203 cm (Figura 7A).

Um dos primeiros mecanismos para manter o nível hídrico no interior da planta é o fechamento dos estômatos. Porém, a consequência desse processo fisiológico é a restrição das trocas gasosas entre o interior da folha e a atmosfera, causando assim redução na assimilação de CO_2 utilizado no processo fotossintético (Larcher, 2004). O déficit de água nos tecidos, causado pelo limitado conteúdo de água no solo, afeta todos os aspectos do crescimento e desenvolvimento das plantas (Taiz e Zeiger, 2017).

Figura 7. Trocas gasosas e altura de planta do milho em função de diferentes lâminas de reposição da ETc, aos 45 DAS.





Em relação ao efeito do déficit de pressão de vapor (DPV) sobre a altura das plantas (Figura 7B), verifica-se que as plantas irrigadas com lâmina de 80% da ETc e 120% da ETc provocaram maiores DPV, indicando que ambas influenciaram no gradiente de energia potencial entre o ar e folha, ocasionando assim diminuição da condutância estomática. Isto pode ter contribuído para redução do tamanho das plantas nesses tratamentos, que registraram altura de 153,40 cm e 187,62 cm, com decréscimos de 24,43% e 7,57% respectivamente, quando comparado com altura de planta de 110% da ETc.

Na Figura 9C observa-se que, como consequência, os menores valores de gs proporcionaram menores perdas de água por transpiração (E) nas plantas irrigadas com lâminas de 80% da ETc e 120% da ETc, interferindo simultaneamente no fluxo difusivo de CO_2 e, consequentemente, evidenciando menor crescimento em altura de planta em ambos tratamentos.

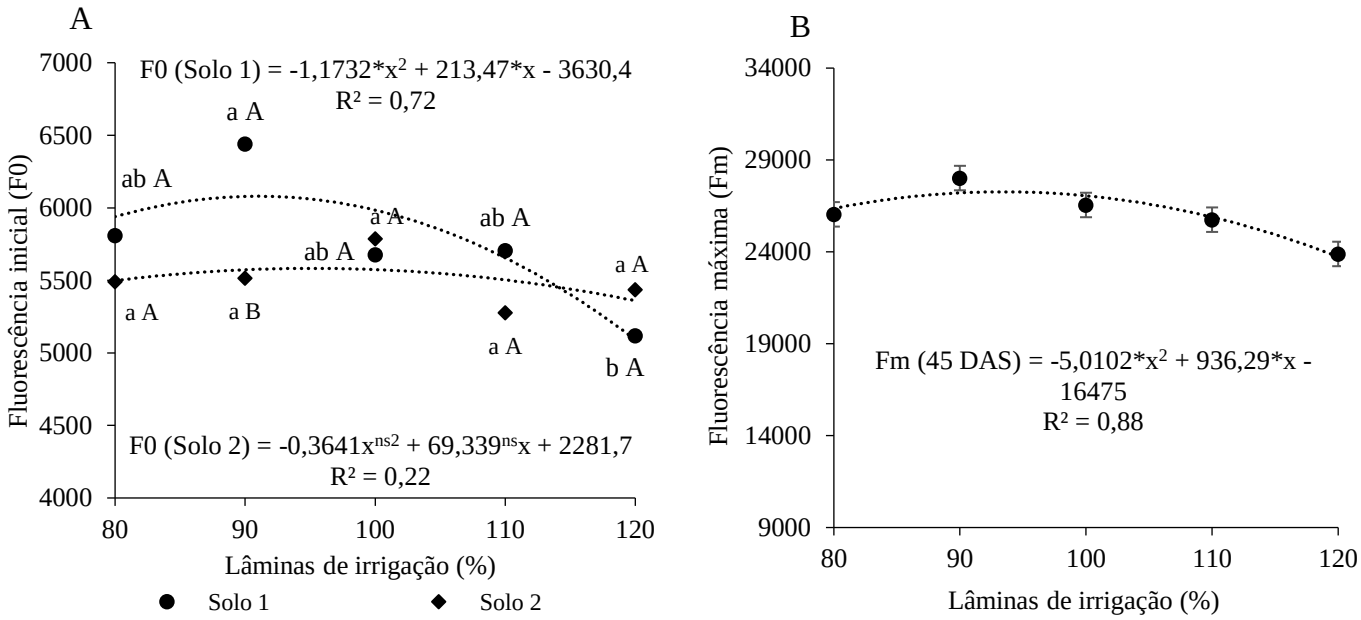
Ao analisar a eficiência instantânea do uso da água (A/E) e sua relação com altura de planta nos diferentes tratamentos, observa-se que as plantas irrigadas com lâminas de 80% da ETc apresentaram maiores valores de eficiência do uso da água, provocando menor crescimento em altura de planta, devido ao déficit hídrico. Segundo Yordanov et al. (2003), espécies tolerantes à seca controlam a função estomática, permitindo a fixação de carbono durante o estresse, melhorando assim a eficiência do uso da água.

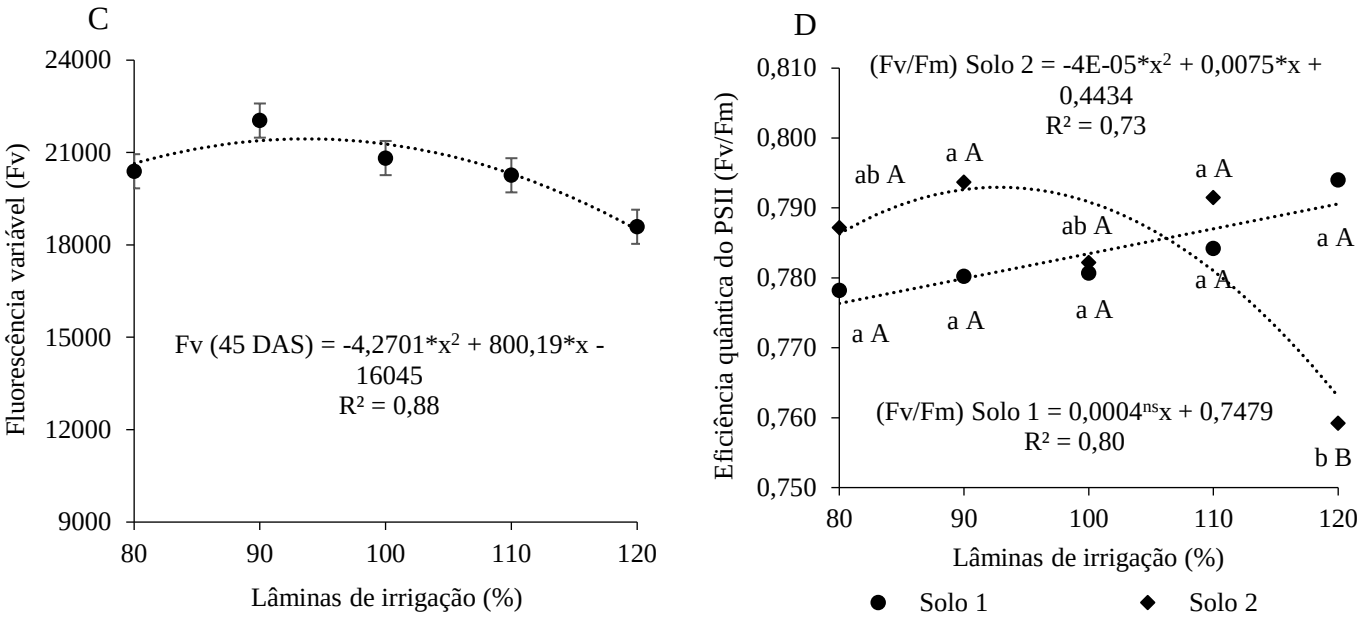
Comportamento semelhante ocorreu com a eficiência intrínseca do uso da água (A/gs) e altura de planta, em que o maior nível de eficiência intrínseca do uso da água ocorreu em plantas irrigadas a 80% da ETc, que por sua vez apresentaram menor altura de planta.

3.6 Fluorescência da clorofila

Na Figura 8A observa-se o desdobramento da interação entre as lâminas de irrigação nos dois tipos de solo para emissão da fluorescência inicial (Fo). Analisando o desdobramento do fator lâminas de reposição da ETc dentro de cada tipo de solo, nota-se efeito significativo ($p<0,05$) apenas para o Solo 1, onde se verifica o máximo de Fo (6080,10 elétrons quantum^{-1}) na lâmina de 90,98% da ETc e valor mínimo de Fo na lâmina 120% da ETc (5091,92 elétrons quantum^{-1}), representando decréscimo de 16,25%. Comparando o fator solo dentro das lâminas de reposição da ETc se observa efeito significativo ($p<0,05$) na lâmina 90% da ETc apresentando maior Fo no Solo 1 (6440,25 elétrons quantum^{-1}) e menor Fo no Solo 2 (5516,00 elétrons quantum^{-1}), representando decréscimo de 14,36%.

Figura 8. Comportamento fisiológico do milho: fluorescência inicial (A); fluorescência máxima (B); fluorescência variável (C) e eficiência quântica do fotossistema II (D), em função de lâminas de reposição da ETc, aos 45 DAS. Para desdobramento médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, maiúscula entre os tipos de solos e minúscula entre as lâminas de irrigação, pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.





A fluorescência inicial explica a emissão da fluorescência quando a quinona receptora primária de elétrons (QA) do fotossistema II (PSII) está totalmente oxidada e o centro de reação (P680) está aberto, indicando ativação das reações fotoquímicas (Baker e Rosenqvst, 2004).

Os autores acrescentam que menores valores de Fo indicam centros de reações mais ativos e consequentemente maior eficiência na fotoquímica, enquanto maiores valores revelariam destruição do centro de reação do PSII (P680) ou diminuição na capacidade de transferência da energia de excitação da antena ao PSII, indicando menor eficiência, visto que mais energia está sendo perdida na forma de fluorescência e não está sendo utilizada para a produção de ATP e NADPH. Esse fato foi registrado, especialmente no tratamento em déficit de água no solo, revelando que o estresse hídrico ocasiona danos irreversíveis às culturas. Além disso, a salinidade da água residuária (5 dSm^{-1}) e do solo (8,59 dS m^{-1}) nesse tratamento também pode ter comprometido o funcionamento do aparato fotossintético.

Em relação ao comportamento da fluorescência máxima (Fm) (Figura 8B), vê-se que esta também se ajustou ao modelo quadrático em função das lâminas de reposição da ETc ($p<0,05$), constatando-se fluorescência máxima (27267,71 elétrons $quantum^{-1}$) na lâmina de 93,44% da ETc e valor mínimo de (23732,92 elétron $quantum^{-1}$) na lâmina de 120% da ETc, apresentando decréscimo de 12,96%.

O valor de Fm é obtido quando toda quinona é reduzida e os centros de reação ficam fechados (Murchie e Lawson, 2013). Valores mais baixos de Fm indicam que existem menos moléculas de clorofila para captura de energia, ou seja, menos centros de reações ativos. Essa redução ter aparecido de forma mais pronunciada em 120% da ETc, sendo um indicativo de que

condições de alto suprimento hídrico (maior lâmina de irrigação) podem prejudicar o aparato fotossintético.

A característica de fluorescência variável (Fv) também se comportou quadraticamente nas lâminas de reposição da ETc (Figura 8C) ($p<0,05$), com valor máximo constatado de 21442,64 elétron quantum^{-1}, quando as plantas receberam lâmina de 93,70% da ETc. Observa-se que houve decréscimo de 13,77% em relação a lâmina de 120% da ETc, apresentando valor mínimo de 18488,36 elétron quantum^{-1}.

A eficiência fotoquímica do PSII (Fv/Fm) é uma variável de grande sensibilidade para alterações no aparato fotossintético. Observa-se o desdobramento da interação entre as lâminas de irrigação nos dois tipos de solo para Fv/Fm (Figura 8D). Analisando o desdobramento do fator lâminas de irrigação dentro de cada tipo de solo, verifica-se efeito significativo ($p<0,05$) apenas para o Solo 2, onde a Fv/Fm atingiu valor máximo (0,795 elétrons quantum^{-1}) para lâmina de 93,75% da ETc e valor mínimo na lâmina de 120% da ETc (0,767 elétrons quantum^{-1}), apresentando um decréscimo de 3,52%. Comparando o fator solo dentro das lâminas de irrigação observa-se efeito significativo ($p<0,05$) na lâmina de 120% da ETc, apresentando maior Fv/Fm no Solo 1 de 0,7940 elétrons quantum^{-1} e menor Fv/Fm no Solo 2 (0,7592 elétrons quantum^{-1}), representando decréscimo de 4,38%.

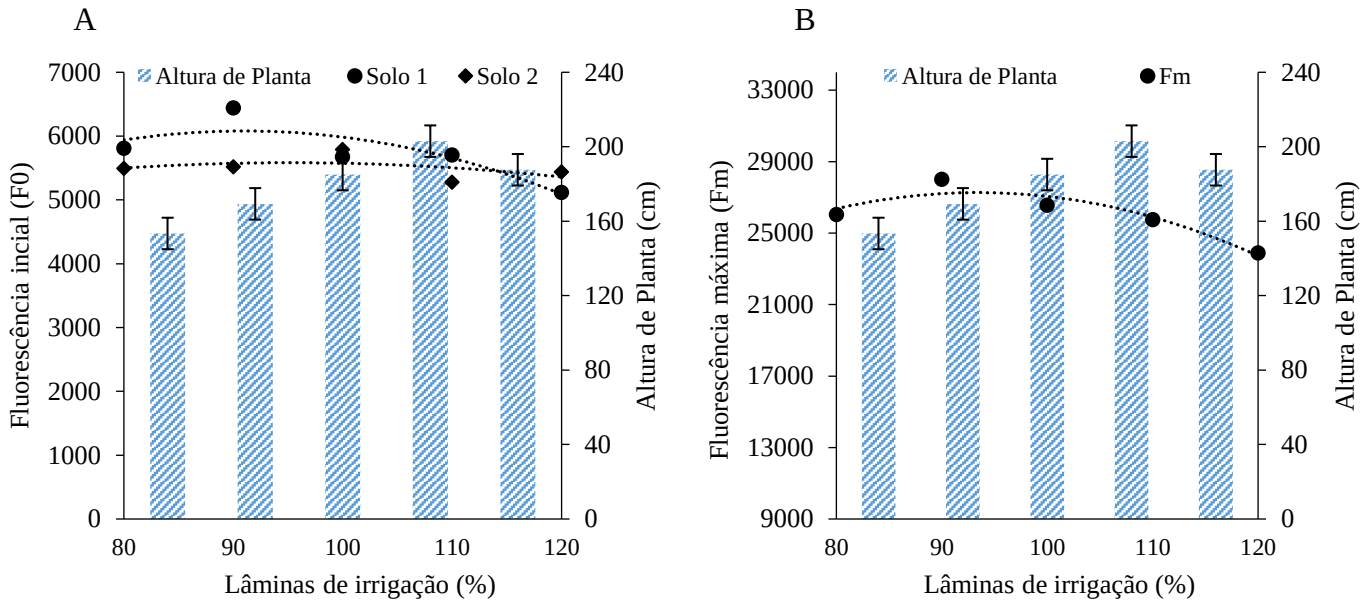
Ressalta-se que mesmo no tratamento de maior restrição hídrica, as plantas de milho apresentaram eficiência fotoquímica acima do limite que poderia causar dano ao fotossistema II, que é de 0,75. Por sua vez, verificou-se que a lâmina de água de 120% da ETc atingiu uma redução em relação às outras. Tal redução também foi observada por Melo et al. (2010) na cultura da melancia. Esses autores evidenciam reduções acentuadas da razão Fv/Fm quando adotaram uma lâmina de irrigação equivalente 130% da ETo. Isso possivelmente indica inibição da atividade fotoquímica nas plantas, tal como ocorre também nos menores níveis de irrigação, já que comumente, esta característica da fluorescência é usada como indicador de estresse, quando fatores bióticos ou abióticos alteram a funcionalidade do fotossistema II (Dias; Marenco, 2007).

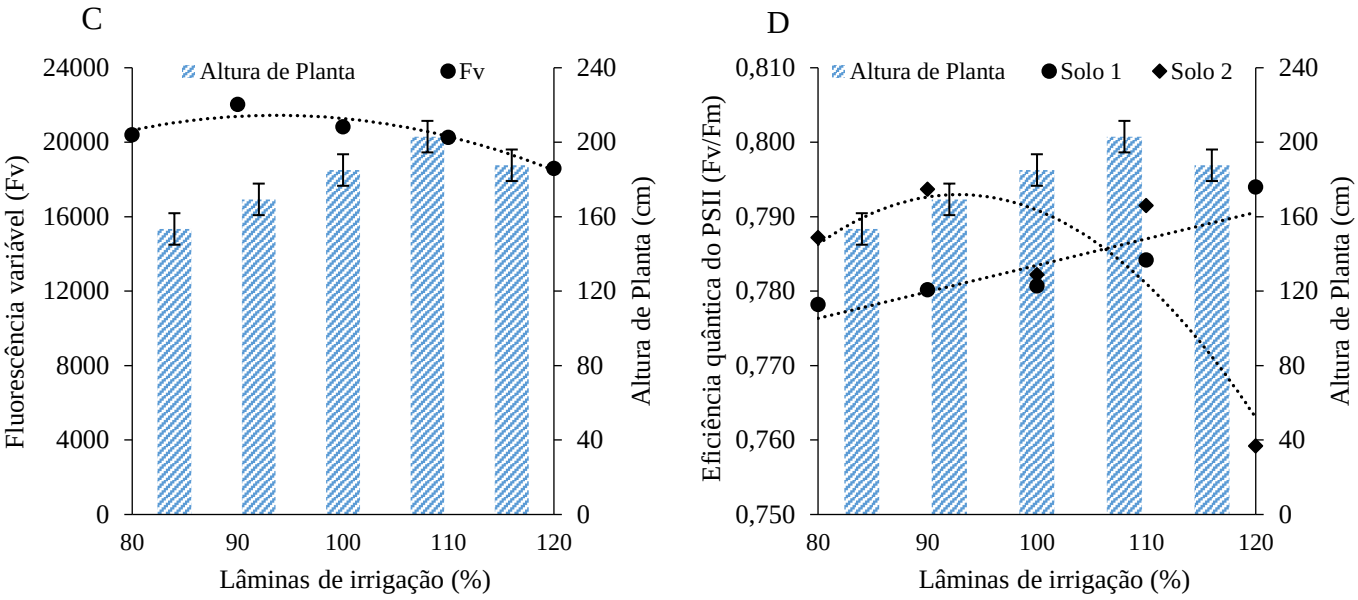
Romero et al. (2003) verificaram que a cultura do milho BRS-4154 teve Fv/Fm de 0,72 quando submetida à saturação do solo. Essa condição de estresse leva à utilização de vias alternativas da respiração anaeróbica, com produção deficiente de energia.

3.7 Fluorescência e os parâmetros de crescimento da planta

A análise biométrica de uma planta sobre estresse reflete o que está ocorrendo em sua fisiologia. A altura da planta aos 45 DAS reflete o impacto de maiores valores de Fo em plantas mais estressadas, apresentando diferenças significativas entre os tratamentos a (p>0,05) (Figura 9A). As plantas com tratamento superior a 100% da ETc foram as que menos sofreram com o estresse hídrico, aumentando seu crescimento de 10,82% em relação ao tratamento mais afetado com estresse hídrico (90% da ETc). Segundo Silva et al. (2008), a variação na altura da planta é um indicativo de tolerância ou suscetibilidade das culturas ao déficit hídrico.

Figura 9. Altura das plantas e índices fisiológicos do milho cultivados com água residuária aos 45 dias após a semeadura em função de lâminas de irrigação.





Em relação ao efeito da Fm sobre a altura das plantas (Figura 9B), verifica-se que a intensidade máxima de fluorescência teve aumento expressivo nos tratamentos com menor crescimento em altura de planta, com lâminas de 80 e 90% da ETc, indicando que neste caso o os maiores valores de Fm encontrados associados com a menor disponibilidade de água, não ocasionaram deficiência na fotorredução da quinona A (QA), nem no fluxo de elétrons entre os fotossistemas (Tatagiba et al., 2014). Ao contrário, plantas irrigadas com lâminas de 120% da ETc, apresentaram menor valor da Fm, o que indica menos centro de reação ativo, podendo estar relacionado com a redução do crescimento em altura de planta.

Na Figura 9C observa-se comportamento similar da Fv ao que ocorreu com a Fm em relação ao crescimento em altura de planta. Como os aumentos de Fv estão relacionados principalmente às modificações em Fm, e quanto maior o valor de Fm pode-se dizer que mais ativo está o aparato fotossintético, pode-se então aferir que as plantas não manifestaram estresse no tratamento com 90% da ETc, ao contrário do que ocorreu no tratamento a 120% da ETc, evidenciando redução em altura de planta. Isso pode ser relacionado às condições de hipoxia causada, notadamente, pelo maior regime hídrico.

A eficiência fotoquímica do PSII associada com altura de planta pode ser observada na Figura 9D. Verifica-se no Solo 1 que o tratamento de 80% da ETc apresentou menor valor de Fv/Fm e consequente menor altura de planta em relação aos tratamentos superiores e no Solo 2 menor valor de Fv/Fm no tratamento de 120% da ETc, que também teve redução de altura de planta. Ressalte-se que sua diminuição indica inibição da atividade fotoquímica (Pereira et al., 2000), fato observado tanto no menor nível (80% da ETc) quanto no maior nível de reposição

de água (120% da ETc). Isso pode ser relacionado às condições de déficit hídrico ou de hipoxia causada, notadamente, pelo maior regime hídrico.

4.0 CONCLUSÕES

A componente osmótica tem grande contribuição para o potencial hídrico ou potencial total do solo da cultivar de milho BR 5026 do IPA, nos estágios de florescimento quando esta é cultivada em ambientes salinos em ambos tipos de solos.

O potencial hídrico foliar do milho aumentou com os acréscimos das lâminas de irrigação nas duas épocas de avaliação, sendo classificado aos 60 DAS sob estresse hídrico moderado com lâmina de 80% da ETc.

Os Planossolos Háplicos têm maior disponibilidade hídrica, favorecendo à manutenção da umidade do solo em relação ao Neossolo Regolítico, que reflete na redução do potencial da água na folha aos 45 DAS. Aos 60 DAS, o Neossolo Regolítico apresentou comportamento inverso, relevando-se com maior contribuição de umidade no solo e disponibilidade hídrica em relação ao Planossolo Háplico.

O potencial hídrico foliar da cultivar BR 5026 do IPA aumenta quando irrigado com água residuária em comparação com água de abastecimento.

Os valores mais expressivos da condutância estomática e transpiração foliar em plantas de milho foram, de forma geral, observados quando se utilizaram lâminas superiores de 100% da ETc. O déficit de pressão de vapor é um indicativo de plantas sob estresse tanto nas lâminas de 80% da ETc quanto 120% da ETc.

A fluorescência inicial (F0) mostrou-se mais sensível na detecção do estresse hídrico no tratamento de 90% da ETc quando comparada com a fluorescência máxima (Fm), fluorescência variável (Fv), rendimento quântico máximo fotoquímico primário (Fv/Fm) que foram mais sensíveis ao excedente hídrico, que corresponde ao tratamento de 120% da ETc.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014.

AZIZIAN, A.; SEPASKHAH, A. R. Maize response to water, salinity and nitrogen levels: physiological growth parameters and gas exchange. **International Journal of Plant Production**, v.8, p.131-162, 2014.

BLANCO, F. F.; FOLEGATTI, M. V. Manejo da água e nutrientes para manejo da água e nutrientes para o pepino em ambiente protegido sob fertirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.2, p.251-255, 2002.

BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **Journal of Experimental Botany**, v.55, n.403, p.1607–1621, 2004.

BASTOS, E. A.; RAMOS, H. M. M.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. DE.; NASCIMENTO, F. N. DO.; CARDOSO, M. J. Parâmetros fisiológicos e produtividade de grãos verdes do feijão-caupi sob déficit hídrico. **Water Resources and Irrigation Management**, v.1, n.1, p.31-37, 2012.

BRITO, M. E. B.; ARAÚJO FILHO, G. D.; WANDERLEY, J. A. C.; MELO, A. S.; COSTA, F. B.; FERREIRA, M. G. P. Crescimento, fisiologia e produção do milho doce sob estresse hídrico. **Bioscience Journal**, v.29, n.5, p.1244-1253, 2013.

CHEN, H.; JIANG, J. Osmotic adjustment and plant adaptation to environmental changes related to drought and salinity. **Environmental Reviews**, v.18, p. 309-319, 2010.

DIAS, D. P.; Marenco, R. A. Fotossíntese e fotoinibição em mogno e acariquara em função da luminosidade e temperatura foliar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira,** v.42, n.3, p. 305-311, 2007.

GHEYI, H. R.; DIAS, N. DA S.; LACERDA, C. F. DE; GOMES FILHO, E. (2.ed.) **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados**. Fortaleza - CE, 2016. 504 p.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normal Climatológica do Brasil 1981-2010**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 28/03/2019.

LARCHER, W. **Ecofiosiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2004. 531 p

MELONI, D. A.; GULOTTA, M. R.; MARTÍNEZ, C.A.; OLIVA, M. A. The effects of salt stress on growth, nitrate reduction and proline and glycine betaine accumulation in *Prosopis alba*. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, v.16, p. 39-46, 2004.

MUDGAL, V.; MADAAN, N.; MUDGA L, A. Biochemical Mechanisms of Salt Tolerance in Plants: A Review. **International Journal Botany**, v.6, p. 136-143, 2010.

MELO, A. S.; SUASSUNA, J. F.; FERNANDES, P. D.; BRITO, M. E. B.; SUASSUNA, A. F.; AGUIAR NETTO, A. O. Crescimento vegetativo, resistência estomática, eficiência fotossintética e rendimento do fruto da melancieira em diferentes níveis de água. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.32, p.73-79, 2010.

MURCHIE, E. H.; LAWSON, T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. **Journal of Experimental Botany**, v.64, n.13, p.3983–3998, 2013.

PEREIRA, W. E.; SIQUEIRA, D. L.; MARTINEZ, C.; PUIATTI, M. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstoks under aluminium stress. **Journal of Plant Physiology**, v.157, n.4, p.513-520, 2000.

ROMERO, J. L.; MAGALHÃES, P. C.; ALVES, J. D.; DURÃES, F. M.; VASCONCELLOS, C. A. Efeito do cálcio sobre algumas características biofísicas e morfológicas de plantas de milho BRS-4154 submetidas ao alagamento do solo. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v.2, n.3, p. 21-33, 2003.

SAMPAIO, A. H. R.; COELHO FILHO, M. A.; CALBO, A. G.; SILVA, T. C.; SANTOS, D. B.; MACHADO, M. S. Leaf and fruit turgor potential in passion fruit plants using wiltmeter and turgormeter. **Journal of Agricultural Physics**, v.14, n.1, p.30-36, 2014.

SANTOS, C. S. DOS.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, M. A. L.; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiration and crop coefficients of Moringa oleifera under semi-arid conditions in Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.12, p.840-845, 2017.

SANTOS, O. O.; FALCÃO, H.; ANTONINO, A. C. D.; LIMA, J. R. S.; LUSTOSA, B. M.; SANTOS, M. G. Desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária sob déficit hídrico e reidratação. **Bragantia**, v.73, n.2 p.820-825, 2014.

SILVA, M. A.; SOARES, R. A. B.; LANDELL, M. G. A.; CAMPANA, M. P. Agronomic performance of sugarcane families in response to water stress. **Bragantia**, v. 67, p.656-661, 2008.

SILVA, F. G. DA.; DUTRA, W. F.; DUTRA, A. F.; OLIVEIRA, I. M. DE.; FILGUEIRAS, L. M. B.; MELO, A. S. DE. Trocas gasosas e fluorescência da clorofila em plantas de berinjela sob lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.10, p.946–952, 2015.

SOUZA, E. J. DE.; CUNHA, F. F.; MAGALHÃES, F. F.; SILVA, T. R.; SANTOS, O. F. Eficiência do uso da água pelo milho doce em diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.10, n.4, p.750-757, 2016.

SUASSUNA, J. F.; MELO, A. S. DE.; COSTA, F. S.; FERNANDES, P. D.; FERREIRA, R. S.; SOUSA, M. S. DA S. Eficiência fotoquímica e produtividade de frutos de meloeiro cultivado sob diferentes lâminas de irrigação. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 32, n. 4, p.1251-1262, 2011.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: ARTMED, 2017. 888p.

TATAGIBA, S. D.; MORAES, G. A. B. K.; NASCIMENTO, K. J. T.; PELOSO, A. F. Limitações fotossintéticas em folhas de plantas de tomateiro submetidas a crescentes concentrações salinas. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.22, p.138-149, 2014.

YORDANOV, I.; VELIKOVA, V.; TSONEV, T. Plant responses to drought and stress tolerance. **Bulgarian Journal of Plant Physiology**, special issue, p.187-206, 2003.

CAPÍTULO VI

Atributos químicos de solos cultivado com milho irrigado com água residuária

ATRIBUTOS QUÍMICOS DE SOLOS CULTIVADO COM MILHO IRRIGADO COM ÁGUA RESIDUÁRIA

RESUMO

A utilização de água residuária apresenta potencial para a irrigação de culturas agrícolas, com disponibilização de nutrientes ao solo, porém o uso mal planejado de tais efluentes pode alterar as propriedades químicas do solo, reduzir a produtividade e acarretar a degradação. Com isso, objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação de efluentes domésticos nos atributos químicos do solo cultivado com milho em solos representativos da bacia do Rio Ipojuca- PE. O experimento foi conduzido em ambiente protegido, adotando-se o delineamento em blocos casualizados, com cinco lâminas de reposição da ETc (80, 90, 100, 110 e 120%) e dois tipos de solos (Solo 1 – Planossolo Háplico; Solo 2 – Neossolo Regolítico), mais 02 testemunhas absolutas, com 4 repetições. Para avaliação do efeito da utilização da água residuária no solo, foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 - 0,30 m aos 80 dias após a semeadura, determinando-se os seguintes atributos: cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Na), P disponível, potencial hidrogeniônico (pH) porcentagem de sódio trocável (PST). A partir do extrato de saturação do solo, foram determinados: condutividade elétrica (CE) e teores de K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e Na^+ e calculou-se a relação de adsorção de sódio (RAS). Realizou-se também o monitoramento do lixiviado, determinando-se os solúveis: Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+} e CE. A aplicação de água residuária de esgoto doméstico tratado provocou alterações químicas nos teores dos trocáveis: P, Na, K, Ca nos dois solos analisados, exceto para o Mg. A irrigação com lâminas sob déficit hídrico possibilitou aumento nos teores de Na^+ e CEes no solo refletindo diretamente na RAS e PST de ambos os solos estudados, sendo necessário um monitoramento dessas variáveis após o período chuvoso, de forma a manter a sustentabilidade do cultivo quando se utiliza com esses tipos de águas. A irrigação com água residuária de origem de efluentes domésticos apresentou uma tendência de aumento nos teores dos solúveis: Na^+, K^+, Mg^{2+} em Neossolo Regolitico, refletindo diretamente na salinidade do solo (CEes). A irrigação com água residuária provocou o aumento dos sais trocáveis e solúveis do solo em comparação quando irrigado com água de abastecimento, exceto para os íons trocáveis Ca e Mg. O uso de lâminas de irrigação superior a 100% da ETc mostrou-se eficiente na remoção dos sais de Na e K principalmente em Neossolo Regolitico das camadas de solo em que foi explorado pelo sistema radicular do milho.

Palavras-chave: Reúso de água, sustentabilidade, química do solo.

CHEMICAL ATRIBUTES OF SOIL CULTIVATED WITH IRRIGATED CORN WITH RESIDUARY WATER

ABSTRACT

Irrigation with wastewater has potential for irrigation of agricultural crops, with nutrient availability to the soil, but the poorly planned use of such effluents migth alter the chemical properties of the soil. Thus, the objective of this study was to evaluate the effects of domestic effluent application on chemical attributes of soil cultivated with corn in representative soil of the Ipojuca-PE river basin. The experiment was carried out in a protected environment, using a randomized block design with five ETc replacement depths (80, 90, 100, 110 and 120%) and two soil types (Haplic Planosol - Soil 1 and Entisol - Soil 2), plus 2 absolute control with 4 replications. To evaluate the effect of the use of wastewater on the soil, soil samples were collected at the layers 0 – 0.30 at 80 days after sowing, determining the following attributes: exchangeable cations (Ca, Mg, K, Na), available P, hydrogen potential (pH) exchangeable sodium percentage (ESP). From the soil saturation extract were determined: electrical conductivity (EC) and K +, Ca^{2+}, Mg^{2+} and Na^{+} contents and the sodium adsorption ratio (SAR) was calculated. The leachate was also monitored and the soluble ones were determined: Na^{+}, K^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+} and EC. The application of treated sewage wastewater caused chemical changes in the exchangeable contents: P, Na, K, Ca in the two soils analyzed, except for Mg. Irrigation with water deficit led to an increase in Na^{+} and ECse levels in the soil, directly reflecting the SAR and ESP of both soils studied, and monitoring of these variables after the rainy season is necessary to maintain the sustainability of the crop when use with these types of waters. Irrigation with wastewater from domestic effluents showed a trend of increasing the soluble contents: Na^{+}, K^{+}, Mg^{2+} in Entisol, directly reflecting the soil salinity (ECes). Irrigation with wastewater caused an increase for soil exchangeable and soluble salts compared to irrigation with fresh water, except for exchangeable Ca and Mg ions. The use of irrigation depths higher than 100% of ETc was efficient to remove Na and K salts mainly in Entisol from the soil layers where the corn root system was present.

Keyword: water reuse, sustainability, soil chemistry.

1.0 INTRODUÇÃO

O Reúso de água para a irrigação proveniente de esgoto doméstico apresenta-se como uma fonte potencial para solucionar problemas decorrentes da escassez hídrica. É uma prática amplamente estudada e recomendada por diversos pesquisadores como alternativa para suprir as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais das plantas, sendo fundamental no planejamento e na gestão sustentável desse recurso (Feitosa et al., 2015; Malafaia et al., 2016; Santos et al., 2017).

Na atualidade, os enfrentamentos pelo uso da água e em função da quantidade expressiva demanda pela irrigação, a utilização de efluentes como fontes normalmente utilizadas para este fim tem aumentado. Diferentes estudos têm apontado para o potencial uso dessas águas na agricultura, por estas águas aumentarem, por exemplo, o pH de solos ácidos, concentrações de P e S disponíveis, K^+ , Ca^{2+}, Mg^{2+} trocáveis, MO, N^- total e diminuição da acidez trocável (Andrade-Filho et al., 2013; Bonini et al., 2014; Silva et al., 2014; Monteiro et al., 2014).

Se por um lado a reutilização do efluente de esgoto tratado pode suprir em parte a falta de fontes d'água naturais para irrigação, por outro, a ausência de controle e regulamentação desta prática, pode provocar mudanças físicas e químicas do solo, contaminação das plantas e trabalhadores, e danos aos sistemas de irrigação. De acordo com Silva et al. (2016), a presença de patógenos microbianos e de metais pesados pode limitar o uso destas águas no sistema agrícola.

A irrigação das culturas com águas residuárias deverá ser dimensionada de acordo com a capacidade de assimilação do sistema água-solo-planta, visando evitar contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas e toxicidade às plantas. Tais fatores dependem de propriedades físicas e químicas, concentração de nutrientes no efluente, controlando desta maneira os níveis de referência dos elementos no solo e na planta. (Pinto et al., 2013).

Como observado por Bonini et al. (2014), que avaliaram as alterações nos atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho após a aplicação de água residuária e de vinhaça, e constataram que houve aumento do percentual de sódio trocável (PST) e condutividade elétrica (CE) nesse solo. Estas variáveis têm relação entre o teor de Na^+ e os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+}, na água de irrigação é quantificado a partir da razão de adsorção de sódio (RAS). Essas observações permitem sugerir que a utilização de águas residuárias na irrigação deve ser feita de maneira cuidadosa, monitorando-se principalmente os teores de sódio e buscando-se alternativas para minimizar possíveis impactos nas propriedades físicas do solo.

Portanto para manter a sustentabilidade produtiva do solo faz-se necessário um uso racional dos recursos. Desta forma, objetivou-se com esta pesquisa avaliar os efeitos da aplicação de efluentes domésticos nos atributos químicos do solo cultivado com milho em solos representativos da bacia do Rio Ipojuca- PE.

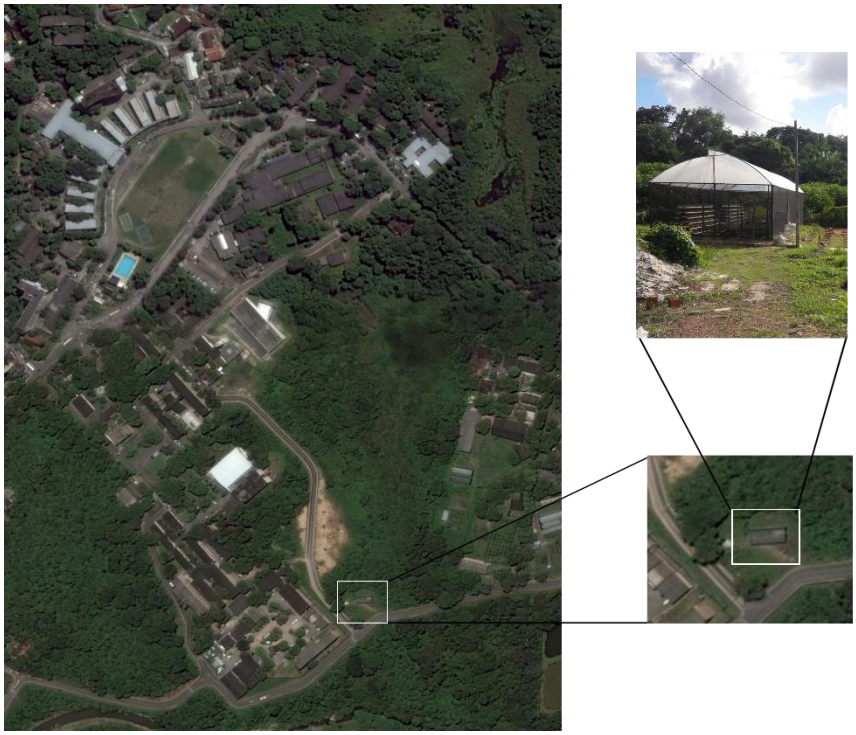
2.0 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização do ambiente experimental

O experimento foi desenvolvido em condições de casa de vegetação da Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE, Campus Recife, sob as seguintes coordenadas geográficas: 08º 01’ 07’’ S e 34º 56’ 53’’ W, e altitude de 6,5 m, de acordo com o sistema SAD 69 (South American Datum) (Figura 1), durante os meses de Dezembro de 2018 a Fevereiro de 2019, com a cultura do milho até os 80 dias após a semeadura (DAS).

O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é As, Megatérmico Tropical (tropical úmido) (Alvares et al., 2014). A precipitação média é de 2.263,5 mm ano^{-1} concentrada, principalmente, entre o outono e o inverno, apresentando uma média de 377,9 mm no mês de mais chuvoso (junho); as temperaturas máxima e mínima do ar de 29,1 e 21,8 °C, respectivamente; a umidade relativa do ar média 79,8%, insolação 2550,7 horas. O total de evapotranspiração média estimada para a região está entre 1.000 e 1.600 mm ano^{-1} (Barros, 2019; INMET, 2019).

Figura 1. Localização da casa de vegetação-UFRPE.



Fonte: Elaborada pela autora.

2.2 Caracterização experimental

A área experimental foi composta por 48 recepientes plásticos com capacidade de 60 L, diâmetro externo na borda superior 0,40 m e altura externa de 0,55 m.

Para preenchimento interno dos recepientes foi colocada uma camada de 2 cm de brita nº1 em cada vaso, a fim de encobrir o dreno e facilitar a drenagem. Após o preenchimento com brita foi colocada sobre a mesma manta geotêxtil, com finalidade de filtro, para evitar a passagem de partículas de solo para a camada inferior. Após a colocação da manta geotêxtil, os sistemas foram preenchidos com 64 kg de solo seco (Planossolo Háplico – Solo 1); 67,21 kg de solo seco (Neossolo Regolítico – Solo 2), por fim sendo alocado em tijolos afim de nivelar a área experimental.

O sistema de drenagem teve na parte inferior de cada vaso um conector de 16 mm adaptado a uma mangueira plástica transparente, direcionando o efluente drenado a uma garrafa PET de 2,0 L, para coleta da solução drenada.

Os solos que foram utilizados são representativos da Bacia do Rio Ipojuca-PE e seus atributos físico-químicos estão dispostos nas Tabelas 1 e 2 (Embrapa, 2017).

Tabela 1. Características físico-química do solo 1 (Planossolo Háplico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
Solo 1	_____g Kg^{-1} _____				g cm^{-3}		___%___	_____%_____		
	711	117	56	116	1,43	2,69	46,84	9,6	4,58	Areia Franca

pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	——————cmol$_c$ dm^{-3}——————						___%___	_mg Kg^{-1}_	____g kg^{-1}____	
7	1,39	2,3	1,6	0	0	0,52	0,49	10,59	109	8,5	4,14

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

Tabela 2. Características físico-química do solo 2 (Neossolo Regolítico) representativo da Bacia do Rio Ipojuca-PE.

	Areia Grossa	Areia Fina	Silte	Argila	Ds	Dp	P	CC	PMP	Classe Textural
Solo 2	_____g Kg^{-1} _____				g cm^{-3}		___%___	_____%_____		
	700	117	47	76	1,60	2,52	51,2	8,3	4,30	Areia Franca

pH (água)	CEes	Ca	Mg	Al	H	Na	K	PST	P	C.O	M.O
	dS m^{-1}	——————cmol$_c$ dm^{-3}——————						___%___	_mg Kg^{-1}_	____g kg^{-1}____	
7	0,54	1,1	1,0	0	0	0,38	0,26	13,86	9	0,9	1,55

Ds: Densidade do solo; Dp: Densidade de partícula; P: Porosidade; CC: Capacidade de campo e PMP: Ponto de murcha permanente.

2.3 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com esquema fatorial (5 x 2) + 2, com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais.

Os tratamentos consistiram em cinco lâminas de reposição da evapotranspiração da cultura (ETc): (80, 90, 100, 110 e 120%), 02 tipos de solos (Planossolo Háplico – Solo 1; Neossolo Regolítico – Solo 2; mais 02 testemunhas. As testemunhas consistiram da irrigação com água de abastecimento com lâmina correspondente a 100% da ETc para o solo 1 e 2. A água de abastecimento foi proveniente de Poço do CEGOE/UFRPE.

2.4 Dimensionamento das águas utilizadas e manejo de irrigação

O efluente líquido tratado foi proveniente da Estação de Tratamento de Reúso e Manejo Hidroagrícola, localizada no Distrito de Mutuca, pertencente ao município de Pesqueira-PE. Para a coleta da água residuária foi utilizado uma tubulação de PVC, oriunda diretamente da lagoa de polimento e com utilização de uma Motobomba Schneider BC-92, de 1,5 CV. Essa tubulação de recalque encaminhou o efluente até o reservatório com capacidade de 1000 litros, onde foi acondicionado.

O efluente foi armazenado em uma caixa de água de 3000 L. Para o tratamento testemunha, foi utilizado um reservatório de 100 L com água de abastecimento.

A determinação da composição físico-química da água residuária e água de abastecimento (Tabela 3) foi realizada pela Agrolab Análises Ambientais e na Companhia Pernambucana de Saneamento - COMPESA, respectivamente. Os parâmetros físico-químicos foram determinados de acordo com a metodologia proposta por APHA (1995).

Tabela 3. Caracterização físico-química da água de abastecimento e da água residuária utilizado no experimento.

Constituintes	Unidade	AB	AR
pH		6,30	8,30
CE	dS m^{-1}	0,13	5,70
STD	µS cm^{-1}	-	2869,0
N-Total	mg L^{-1}	-	23,6
P -Total	mg L^{-1}	-	2,0
K^{+}	mg L^{-1}	2,50	85,8
Ca^{2+}	mg L^{-1}	0,90	34,5
Mg^{2+}	mg L^{-1}	0,60	50,9
Na^{+}	mg L^{-1}	5,40	782,0
Nitrato	mg L^{-1}	0,02	42,4
Cloretos	mg L^{-1}	15,40	950,0
Sulfato	mg L^{-1}	-	103,7
Bicarbonato	mg L^{-1}	-	647,2

O critério adotado na definição das lâminas de irrigação com efluente doméstico tratado (aplicadas manualmente) na implantação dos tratamentos baseou-se no sistema de drenagem dos tratamentos com 100% da ETc (Equação 1). A frequência da aplicação do efluente doméstico foi com turno de rega de dois dias.

$$I = (La - Ld) + 10\% \quad (1)$$

Em que: I – Irrigação aplicada (L); La – lâmina aplicada (L); Ld – lâmina drenada (L).

A lâmina foi aplicada com base no consumo diário (La-Ld) observado, somado a 10% deste, garantindo a drenagem. A esta lâmina foi somada ao percentual de lâmina de irrigação correspondente a cada tratamento em ambos os tipos de solos.

Para o critério da lâmina de irrigação nas plantas irrigadas com água de abastecimento (Testemunhas) baseou-se na evapotranspiração da cultura, onde foram distribuídos três vasos preenchidos com solo 1 – Planossolo Háplico e três vasos preenchidos com solo 2 – Neossolo

Regolítico, totalizando seis vasos (lisímetros) adicionais entre os demais. Todos também semeados com milho, cv. BR 5026 IPA no mesmo dia dos demais. Assim, os solos foram colocados na capacidade de campo, evitando variação na água drenada e, em seguida, foi estimada a evapotranspiração da cultura (ETc), conforme Aboukhaled et al. (1982) (Equação 2):

$$ET_C = P + I - D/A \quad (2)$$

Em que: ETc - Evapotranspiração da cultura (mm); P - Precipitação pluviométrica (mm); I - Lâmina de água aplica por irrigação (mm); D - Água drenada do lisímetro (mm); A – Área do lisímetro (m^2). Considerou-se a precipitação igual a zero por ser cultivo em ambiente protegido.

2.5 Descrição e implementação das culturas

A semeadura do milho foi realizada manualmente a 5 cm de profundidade, usando-se 5 sementes $vaso^{-1}$, logo após foi realizado o desbaste, restando apenas 1 planta $vaso^{-1}$. Utilizou-se a cultivar BR 5026 do IPA (São José). A cultivar foi semeada no espaçamento de 0,7 m entre linhas e 0,30 m entre plantas.

Para suprir as necessidades nutricionais da cultura foi realizada adubação segundo o Manual de Recomendação de Adubação do Instituto Agronômico de Pernambuco (Cavalcanti et al., 2008). A adubação mineral convencional consistiu em 90 kg ha^{-1} de N, 20 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 20 kg ha^{-1} de K_2O. O nitrogênio foi parcelado, com a aplicação de 30 kg ha^{-1} de N, na forma de ureia, por ocasião da emergência, e o restante (60 kg ha^{-1}) com 40 dias após a semeadura (DAS).

2.6 Determinação dos trocáveis e solúveis do solo

Para avaliar o efeito dos tratamentos nas características químicas do solo foram realizadas coletas utilizando um trado do tipo holandês, na camada de 0-0,30 m de profundidade, aos 80 DAS. As amostras foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm e submetidas às análises químicas. Determinaram-se os atributos cátions trocáveis (Ca, Mg, K, Na), fósforo disponível (P), acidez potencial (H + Al) e porcentagem de sódio trocável (PST).

Para os cátions trocáveis Ca e Mg, a extração foi feita com uma solução de KCl 1 mol L^{-1}, e para Na, K e P foi utilizado a extração com $Mehlich^{-1}$ (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4 0,0125 mol L^{-1}), determinando-se os teores no extrato; para a acidez potencial, a extração foi feita com acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1}. A capacidade de troca de cátions (CTC) foi obtida por meio do

somatório dos cátions trocáveis (Ca^+ Mg^+ Na^+ K^+ H^+ Al), e a PST foi calculada utilizando a Equação 1. Todos esses atributos foram determinados conforme a metodologia proposta pela Embrapa (2009).

$$PST = \frac{Na^+}{CTC} \times 100 \quad (1)$$

Em que: PST - Porcentagem de sódio trocável (%); Na - Teor de sódio no solo (cmolc dm^{-3}); CTC - Capacidade de troca de cátions (cmolc dm^{-3}).

Para determinação dos elementos solúveis, preparou-se pasta de saturação do solo, conforme a metodologia de Richards (1954), e foram determinados as seguintes variáveis: condutividade elétrica (CEes), e concentrações de Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+ e K^+, e calculou-se a relação de adsorção de sódio (RAS) (Equação 2).

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

Em que: RAS - relação de adsorção de sódio (mmol $dm^{-3})^{0,5}$; Na - concentração de sódio no solo (mmol dm^{-3}); Mg - concentração de magnésio no solo (mmol dm^{-3}).

2.7 Monitoramento do material lixiviado

Coletou-se uma alíquota da água drenada para posterior análise dos nutrientes: cálcio, magnésio, potássio e o íon sódio, além do monitoramento da condutividade elétrica (CE), em 5 épocas de análise: 24 de janeiro de 2019; 29 de janeiro de 2019; 06 de fevereiro de 2019; 15 de fevereiro de 2019 e 27 de fevereiro de 2019.

2.8 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e teste F utilizando-se o software estatístico SISVAR 5.6 (Ferreira, 2011), com nível de significância de 0,05 de probabilidade para o teste de média, regressão e contraste dos dados.

Os contrastes ortogonais foram realizados com as testemunhas *vs* água residuária que corresponde: (100% de água de abastecimento *vs* 100% de água residuária) nos dois solos analisados.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Elementos trocáveis

A partir da análise de variância dos fatores estudados, observou-se aos 80 DAS efeito significativo do fator isolado lâminas de reposição da ETc apenas para Na e PST ($p<0,05$). Para o fator isolado tipos de solos, houve efeito significativo para P, K, Ca, Mg e PST ($p<0,01$), (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da ANOVA para pH, PST e elementos trocáveis de P, Na, K, Ca, Mg no cultivo do milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos aos 80 DAS.

		Quadrado Médio						
		Trocáveis						
Fontes de variação	GL	pH	P	Na	K	Ca	Mg	PST
Lâminas (L)	4	$0,173^{ns}$	$2167,53^{ns}$	$0,411^{*}$	$0,009^{ns}$	$0,120^{ns}$	$0,027^{ns}$	$58,83^{*}$
Solos (S)	1	$0,056^{ns}$	$114276,10^{**}$	$0,002^{ns}$	$0,361^{**}$	$16,705^{**}$	$0,132^{**}$	$857,56^{**}$
Lx S	4	$0,038^{ns}$	$1230,53^{ns}$	$0,333^{ns}$	$0,024^{ns}$	$0,111^{ns}$	$0,023^{ns}$	$46,05^{ns}$
Bloco	3	$0,436^{**}$	$2325,40^{ns}$	$0,011^{ns}$	$0,011^{ns}$	$0,025^{ns}$	$0,041^{ns}$	$5,52^{ns}$
Resíduo	27							
CV	%	3,65	25,53	19,87	10,80	15,21	15,45	13,93

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} Não significativo, pelo teste F

A faixa de pH adequado para a águas de irrigação está entre 6,5 e 8,4. Segundo Ayers & Westcot (1991), efluentes de sistemas biológicos de tratamento de esgotos com pH fora dessa faixa poderão causar desequilíbrios nutricionais à planta. O pH do solo apresentou valor médio de 8,50 aos 80 DAS, não havendo efeito significativo dos fatores estudados nessa variável (Tabela 4).

Observa-se na Figura 2A, que o maior teor de P foi encontrado no solo 1, obtendo-se um valor de 197,15 mg dm^{-3}, com incremento de 118,44% em relação ao solo 2, que apresentou 90,25 mg dm^{-3}. Tal comportamento pode ser explicado pelo alto teor de P no solo 1 ao início do experimento e à contribuição de P via água residuária ao longo da irrigação, ocasionando tendência de acúmulo devido sua baixa mobilidade no solo.

Nascimento et al. (2015) observaram que, após aplicação da água residuária no solo, os teores de fósforo aumentaram de 87,0 mg dm^{-3} para 112 mg dm^{-3}. Este fato se deve provavelmente aos teores de fósforo presente na água residuária, pois o menor valor foi encontrado no tratamento irrigado com água de abastecimento, que reduziu 87,0 mg dm^{-3} (antes do experimento) para 38,36 mg dm^{-3} (no final do experimento).

Para o teor de Na no solo observou-se comportamento linear decrescente em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 2B), obtendo-se teor máximo estimado de 2,03 cmolc dm^{-3} na lâmina de 80% da ETc, e teor mínimo de 1,60 cmolc dm^{-3}, quando irrigado com a lâmina de 120% da ETc, representando um decréscimo de 21,18%.

O íon Na^+ apresenta um elevado raio hidratado e possui dificuldade de se aproximar das partículas sólidas do solo carregado negativamente. Desta forma, teores muito elevados de Na^+ no solo podem diminuir a permeabilidade à água e ao ar, alterando algumas propriedades físicas do solo pela dispersão dos coloides, bem como entupir os microporos reduzindo a aeração e a infiltração de água (Almeida et al., 2007; Medeiros et al., 2009).

Urbano et al. (2015), após a irrigação de água de REÚSO de esgoto doméstico em Latossolo Vermelho distrófico, em 5 ciclos de cultivo de alface, constataram que a concentração de nutrientes no solo aumentou, incluindo o Na, com tendência à salinização, mas não houve danos às propriedades físicas do solo. Já Medeiros et al. (2011) observaram que os teores de Na aumentaram em todas as camadas de solo (0 a 1,0 m, avaliado a cada 0,2 m), em todas as diferentes dosagens de efluente de suinocultura, com maiores teores verificados nas áreas que receberam efluente tratado.

Na Figura 2C verificou-se maior teor de K no solo 2, apresentando valor de 0,94 cmolc dm^{-3} com incremento de 25,33% em relação ao solo 1, que apresentou valor médio de 0,75 cmolc dm^{-3}. Ambos os solos analisados apresentaram incremento nos teores de K ao final da etapa experimental, influenciado provavelmente pelo teor de K na água residuária. De acordo com Bertol et al. (2010), o potássio tem baixa reatividade com o solo, podendo ocorrer uma mobilidade maior.

Trabalhando com água residuária de bovinocultura, Andrade Filho et al. (2013) também observaram aumento na concentração de K^+ em consequência do aumento da concentração de água residuária. Segundo esses autores, o acúmulo de K^+ no solo além de ser um indicador para se realizar monitoramento deste cátion é usado como referência na definição de doses a serem aplicadas.

Ao analisar a Figura 2D, observou-se maior teor de Ca no solo 1, com valor médio de 2,71 cmolc dm^{-3} e acréscimo de 90,84% em relação ao solo 2, que apresentou valor de 1,42 cmolc dm^{-3}. Este comportamento já era esperado devido à água residuária apresentar valor alto deste íon, contribuindo para aumento dos teores de cálcio nos dois solos analisados em relação ao início do experimento.

O teor do magnésio trocável (Mg^{2+}) no solo foi semelhante ao cálcio, ou seja, ocorreu maior concentração no solo 1 com valor de 0,90 cmolc dm^{-3}, apresentando acréscimo de 15,38% em relação ao solo 2 que registrou valor de 0,78 cmolc dm^{-3}. Entretanto, ao analisar o teor ao início do experimental, percebeu-se redução do teor de magnésio em ambos os tipos de solos, indicando que houve extração pelas plantas em quantidades maiores que as adicionadas pela água residuária ou provavelmente pode ter ocorrido desbalanço nutricional entre a relação K/Mg. Resultado semelhante também foi encontrado por Caovilla et al. (2010), que constataram que os níveis médios de magnésio foram poucos afetados com a aplicação das águas residuárias de suinocultura.

Analisando-se o efeito das lâminas de reposição da ETc na PST do solo (Figura 2F), observou-se que a lâmina de 80% da ETc proporcionou valor mais elevado na PST do solo apresentando máximo estimado de 36,09 % e valor mínimo estimado de 30,13 % na lâmina de 120% da ETc, apresentando decréscimo de 16,52%.

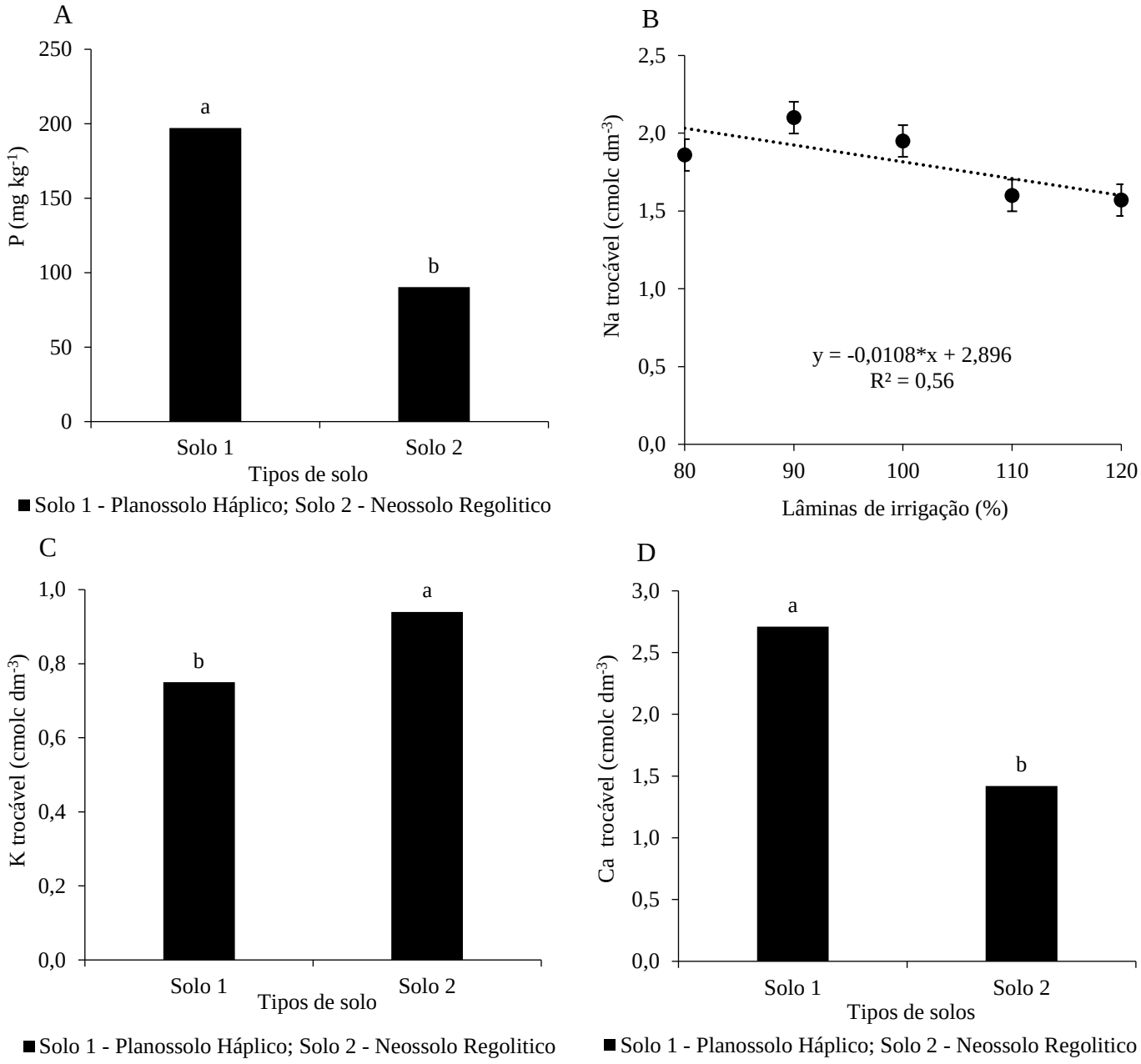
Em relação ao fator isolado tipo de solo, observou-se maior valor de PST verificado no solo 2, apresentando teor percentual de 37,75%, obtendo um incremento de 32,50% em relação ao solo 1 que registrou teor percentual de 28,49% na PST. A maior elevação da PST no solo 2 já era esperado em virtude da maior RAS deste tipo de água, ratificando assim, a necessidade de monitoramento dos atributos químicos do solo, quando se faz uso dessas fontes de água.

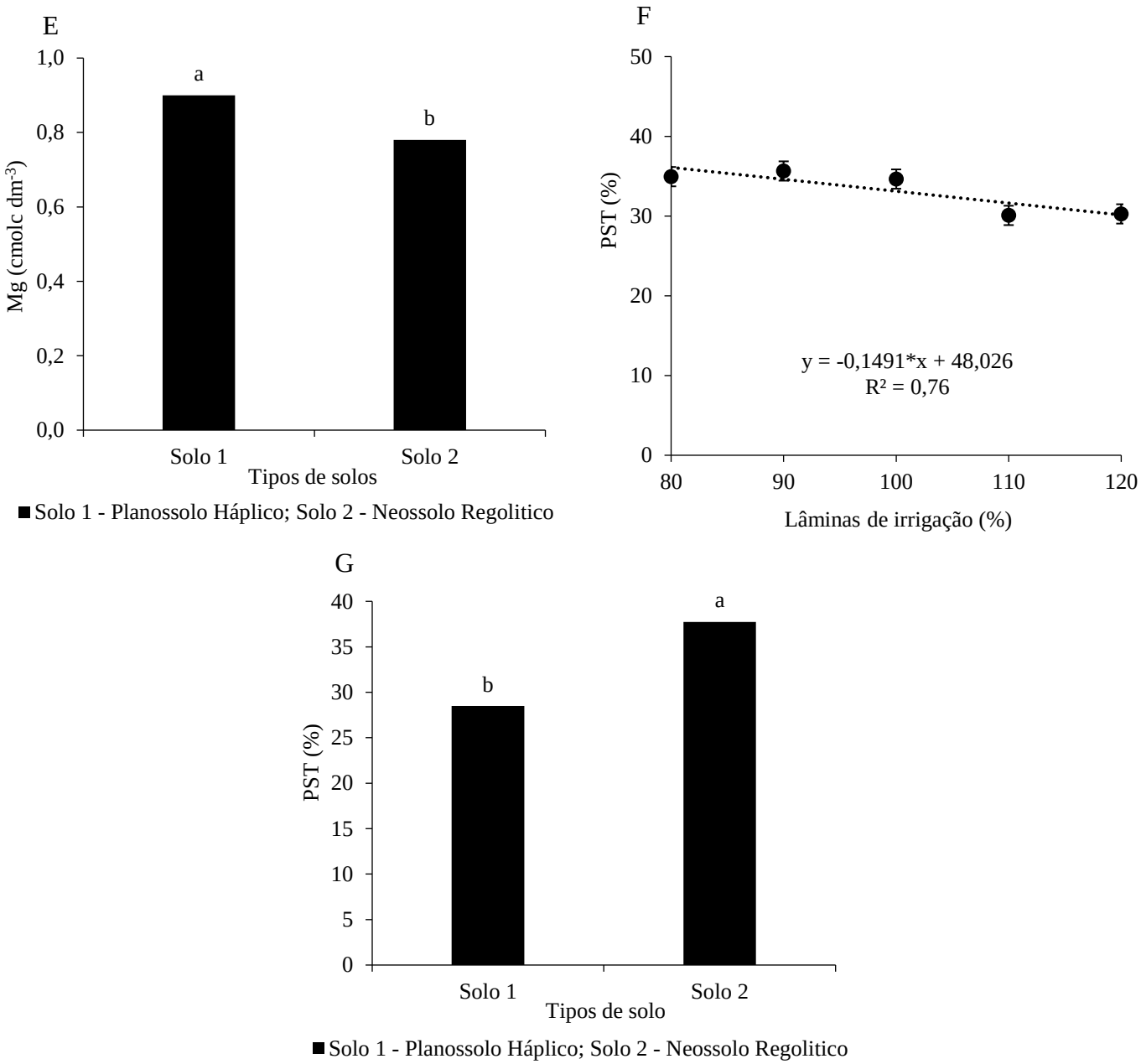
Com o aumento da PST eleva-se o risco de deterioração das propriedades físicas, com a dispersão de argilas e desestruturação do solo a partir da quebra dos agregados, bloqueando os poros e diminuindo a permeabilidade. Esse processo quando ocorre periodicamente pode afetar a condutividade hidráulica do solo, prejudicando o crescimento das plantas, diminuindo a lixiviação levando a salinização (Bond, 1998).

Corroborando com este resultado, Leal et al. (2009) verificaram, após a aplicação de efluentes domésticos, durante 16 meses, um aumento de 4% para 26% na PST do solo, com aumento da porcentagem de argila dispersa em água. Segundo Gloaguen et al. (2007) e Fonseca et al. (2007), essas alterações na PST são os principais entraves observados quando se utilizam efluentes domésticos na irrigação.

Ambos os solos, apresentarem condições sódicas, uma vez que os valores de CE, PST e pH eram, respectivamente, de >4dS m^{-1}, >15% e >8,5 (Richards, 1954).

Figura 2. Teores de P (A) Na (B), K (C), Ca (D), Mg (E) e PST (F) no cultivo do milho irrigado com lâminas de reposição da ETc e tipos de solos. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos pelo teste de Tukey ($p<0,05$).





3.2 Contraste Água residuária vs Testemunhas

Na Figura 3A, observou-se que para o pH houve efeito significativo nos três contrastes analisados ($p<0,01$), onde percebeu-se que a utilização de água residuária proporcionou um aumento médio no pH do solo de 13,19%, 15,27% e 14,21% em relação à utilização da água de abastecimento, respectivamente.

Na literatura há relatos de aumento (Jnad et al., 2001, Gloaguen et al., 2007, Pereira et al., 2011), como de redução do pH do solo decorrente da aplicação de água residuárias na agricultura. Assim, o pH pode aumentar, em razão da adição de cátions trocáveis e ânions

presentes nos efluentes (Stewart et al., 1990), ou reduzir devido à rápida nitrificação da amônia e amônio, liberando íons de hidrogênio que permanecem adsorvidos aos coloides do solo (Jnad et al., 2001); a redução também pode acontecer devido à formação de ácidos orgânicos decorrente da degradação da matéria orgânica pelos microrganismos, produzindo dióxido de carbono (Bouwer e Chaney, 1974).

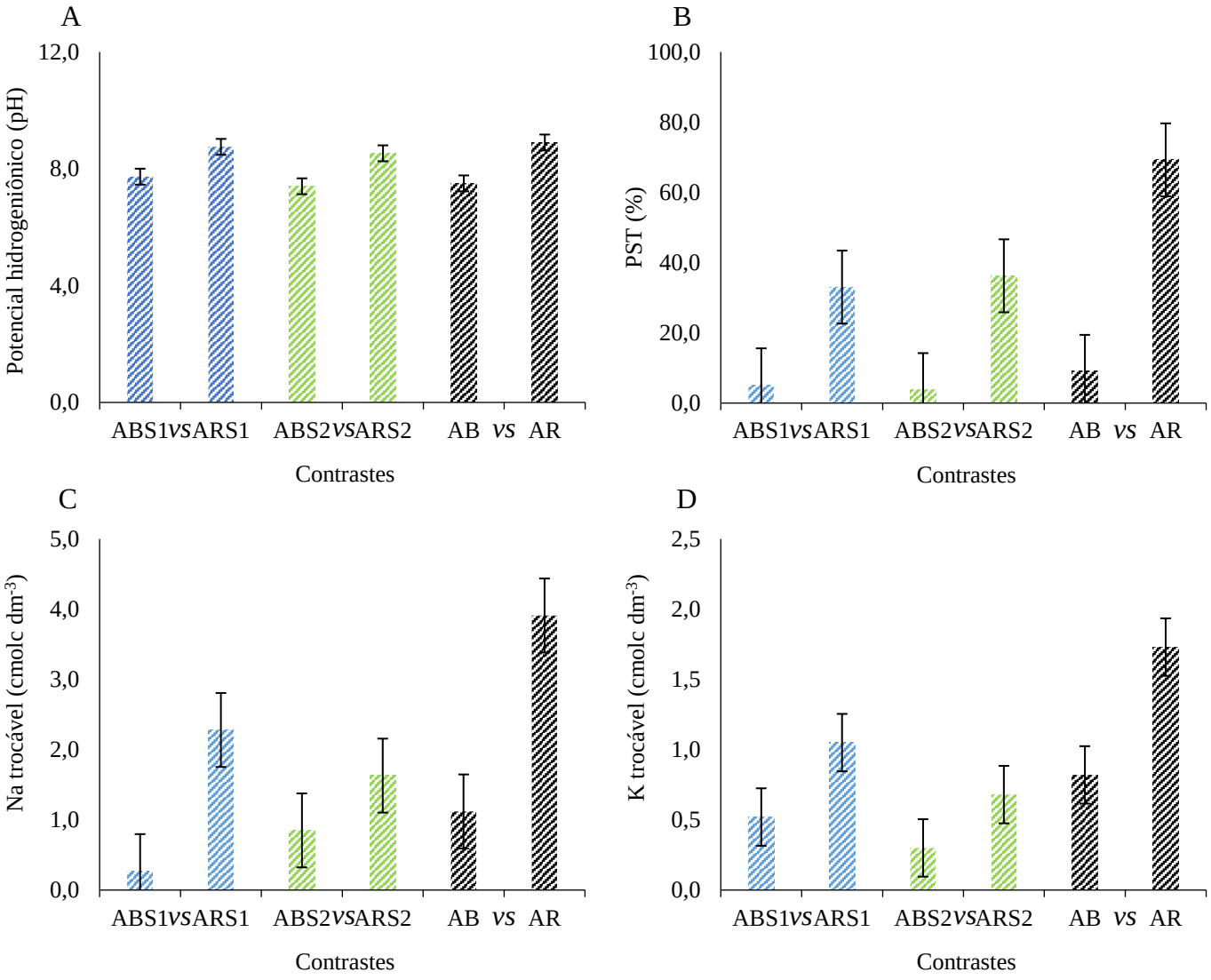
Ao analisar a Figura 3B, verificou-se também efeito significativo para PST nos três contrastes analisados ($p<0,01$), em que constatou-se acréscimos com a utilização da água residuária de 535,19%, 844,01% e 66,37% em relação a água de abastecimento. A PST indica a saturação do complexo de troca do solo pelo íon sódio, sendo obtida pela relação entre o teor de sódio trocável e a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo (Meurer, 2010). Essas observações permitem sugerir que a utilização de águas residuárias na irrigação deve ser feita de maneira cuidadosa, monitorando-se principalmente os teores de sódio e buscando-se alternativas para minimizar possíveis impactos nas propriedades físicas do solo.

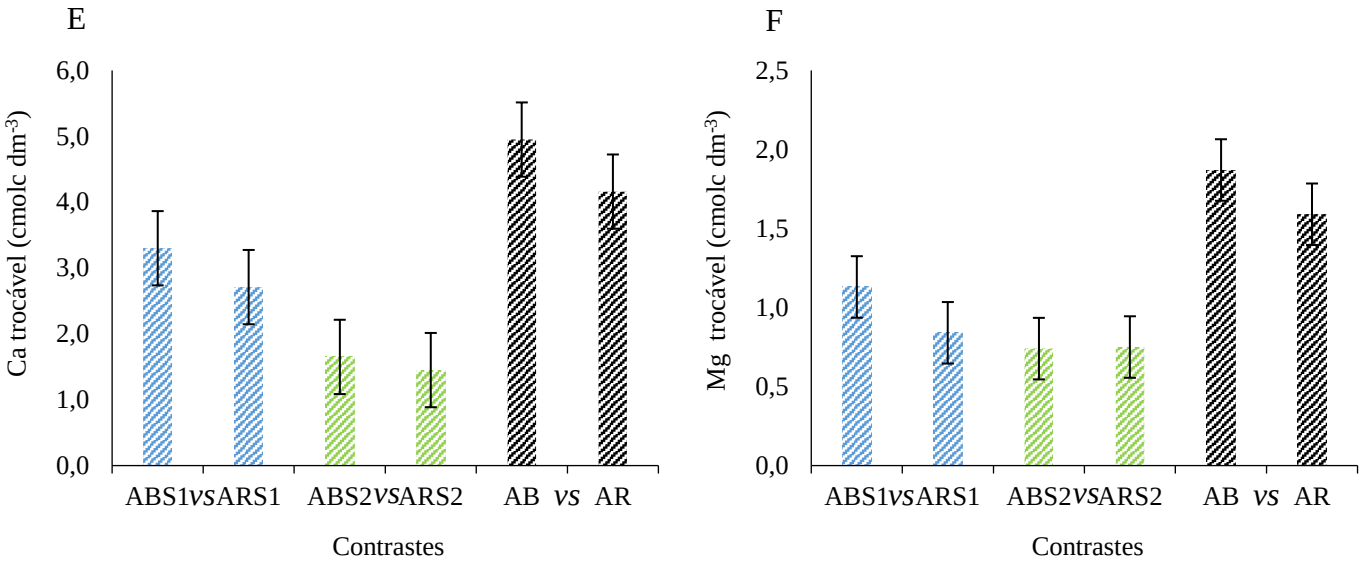
Observou-se na Figura 3C efeito significativo para Na nos três contrastes analisados ($p<0,01$), verificando-se aumentos nos teores de Na quando irrigado com água residuária de 744,44%, 91,76% e 249,10% em relação a água de abastecimento. Fato este que pode ser atribúido a contribuição de sódio proveniente da água residuária, bem como a constituição desse elemento nos solos estudados.

Em relação ao íon K, constatou-se efeito significativo para os três contrastes analisados ($p<0,01$) também verificando-se a influência da água residuária em ambos os solos analisados, com aumentos de 101,92%, 126,66% e 110,97% em relação a água de abastecimento, respectivamente (Figura 3D).

Na Figura 3E e 3F, observou-se efeito significativo para os íons Ca e Mg ($p<0,01$) apenas para o contraste (ABS1 *vs* ARS1), verificando-se decréscimos nos teores desses elementos quando irrigado com água residuária de 17,87% e 25,66% em relação a água de abastecimento. É possível então, que os menores teores de Ca e Mg nos solos analisados se devam à maior extração pela cultura do milho, reduzindo sua concentração ao final do ciclo.

Figura 3. Teste de contraste para pH, (A) PST (B) e teores de Na (C), K (D), Ca (E), Mg (F) nos solos irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR) aos 80 DAS. (**) Significativo a 0,01 e 0,05 de probabilidade pelo teste F.





3.2 Elementos Solúveis

Observou-se efeito significativo do fator isolado lâminas de reposição da ETc para CEes ($p<0,01$). Para o fator isolado tipos de solos, verificou-se que houve efeito significativo para K, Ca e Mg ($p<0,01$) e ($p<0,05$) (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da ANOVA para CEes, RAS e elementos solúveis Na, K, Ca, Mg no cultivo do milho em função das lâminas de reposição da ETc e tipos de solos aos 80 DAS.

		Quadrado Médio					
		Solúveis					
Fontes de variação	GL	CEes	RAS	Na	K	Ca	Mg
Lâminas (L)	4	11,86**	343,74^{ns}	1567,10^{ns}	60,05^{ns}	5,38^{ns}	1,60^{ns}
Solos (S)	1	0,69^{ns}	244,62^{ns}	2218,01^{ns}	224,34**	11,97*	8,32*
Lx S	4	13,58^{ns}	422,26^{ns}	1481,822^{ns}	70,29^{ns}	3,79^{ns}	4,47^{ns}
Bloco	3	2,74^{ns}	214,01^{ns}	1122,94^{ns}	29,28^{ns}	3,76^{ns}	1,07^{ns}
Resíduo	27						
CV	%	26,32	26,40	27,47	42,67	27,15	30,71

*,** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente; ^{ns} Não significativo, pelo teste F

De acordo com a análise de regressão o modelo quadrático ajustou-se aos dados de CEes em função das lâminas de reposição da ETc (Figura 4A), tendo valor máximo de 7,67 dS m^{-1} quando estimado com lâmina correspondente a 94,35% da ETc, revelando um incremento de 10,03%, sobre a lâmina de 80% da ETc. Tal fato aconteceu porque não houve deslocamento dos sais nos tratamentos que não apresentavam sistema de drenagem, influenciando na concentração de sais na superfície do solo. Richards (1954), afirma que a diminuição da

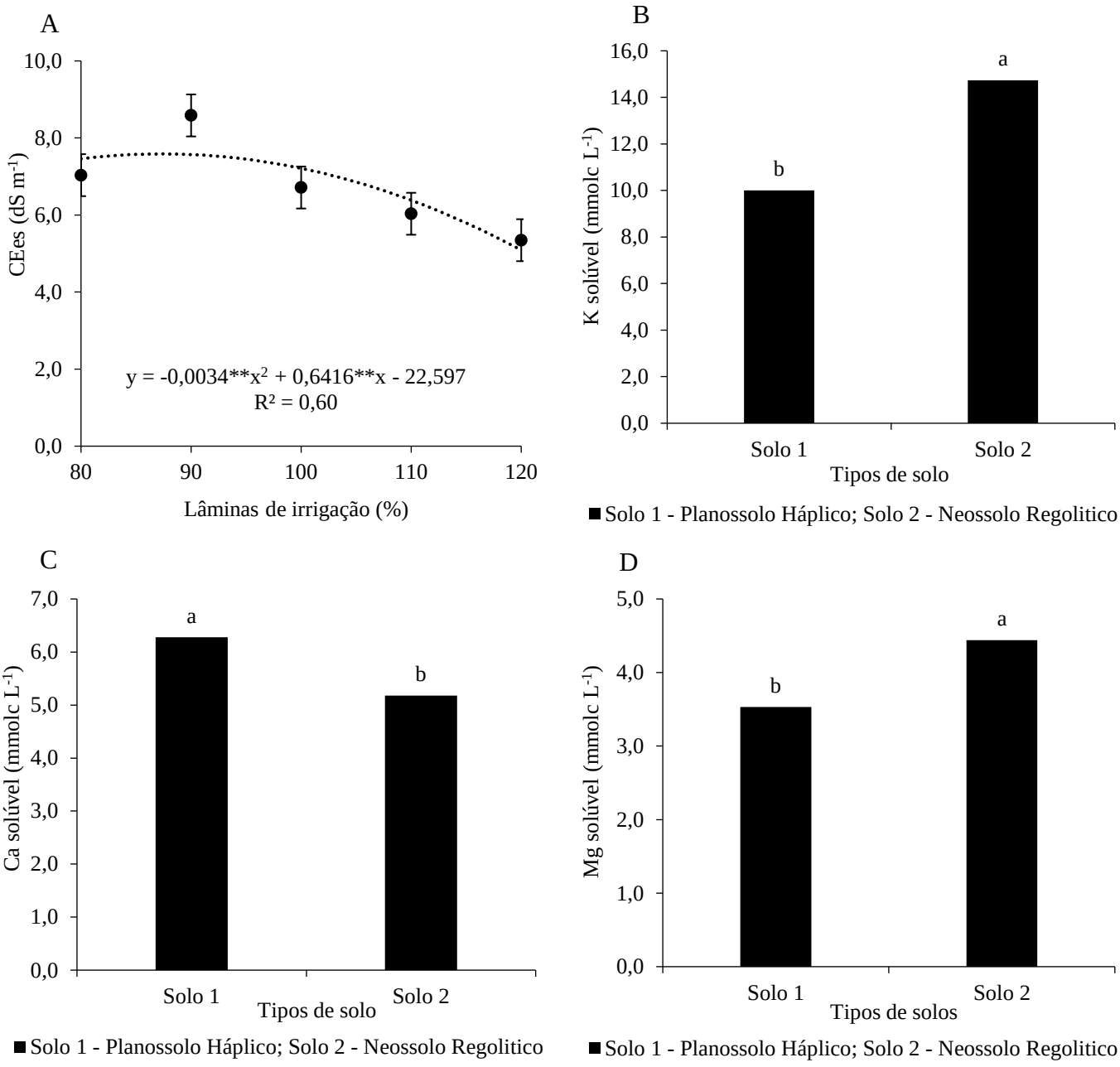
quantidade de sais solúveis relaciona o simples processo de solubilização e a consequente remoção pela água de percolação.

Quanto ao teor de K solúvel (Figura 4B), também notou-se altos valores desse elemento no solo 2, apresentando valor médio de (14,73 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$ e incremento de 47,3% em relação ao solo 1 que registrou média de (10,00 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$. Isto pode ser explicado pela diferença em suas características físicas, uma vez que quanto menor a velocidade de infiltração da água, maior a interação entre os íons e as partículas coloidais, ocasionando uma maior taxa de retenção desses íons (Oliveira et al., 2016).

Quanto ao teor de Ca solúvel, observou-que o solo 1 apresentou maior média de (6,28 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$ em relação ao solo 2 que obteve valor médio de (5,18 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$, representando acréscimo de 21,23% (Figura 4C).

Observou-se na Figura 4D, alto teor de Mg solúvel no solo 2 com valor médio de (4,44 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$ em relação ao solo 1 que obteve teor médio de (3,53 mmolc L^{-1})$^{-0,5}$ registrando aumento de 25,77%.

Figura 4. Teores de CEes (A) e dos elementos solúveis K (B); Ca (C) e Mg (D) no cultivo do milho irrigado com lâminas de reposição da ETc e tipos de solos. Letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tipos de solos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).



3.3 Contraste Água residuária vs Testemunha

Na Figura 5A, observou-se que houve efeito significativo nos três contrastes analisados ($p<0,01$) para CEes, onde notou-se que a utilização de água residuária proporcionou um aumento médio da CEes do solo de 928,81%, 1535,55% e 1291,34% em relação à utilização da água de abastecimento, respectivamente.

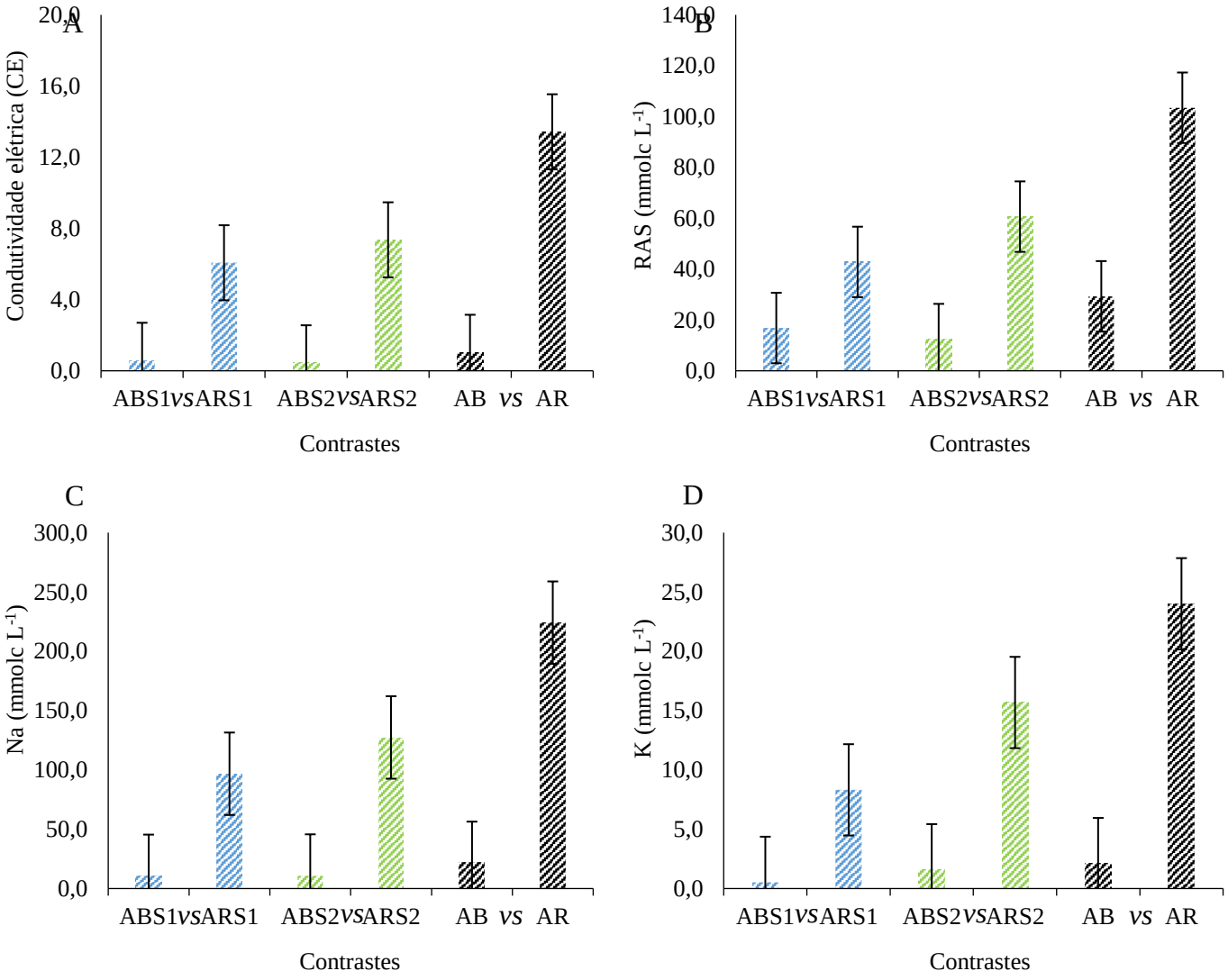
Verificando-se a Figura 5B, houve efeito significativo para todos os contrastes analisados para RAS ($p<0,01$), apresentando acréscimos quando irrigado com água residuária de 154,58%, 386,37% e 253,14% em relação a água de abastecimento, respectivamente.

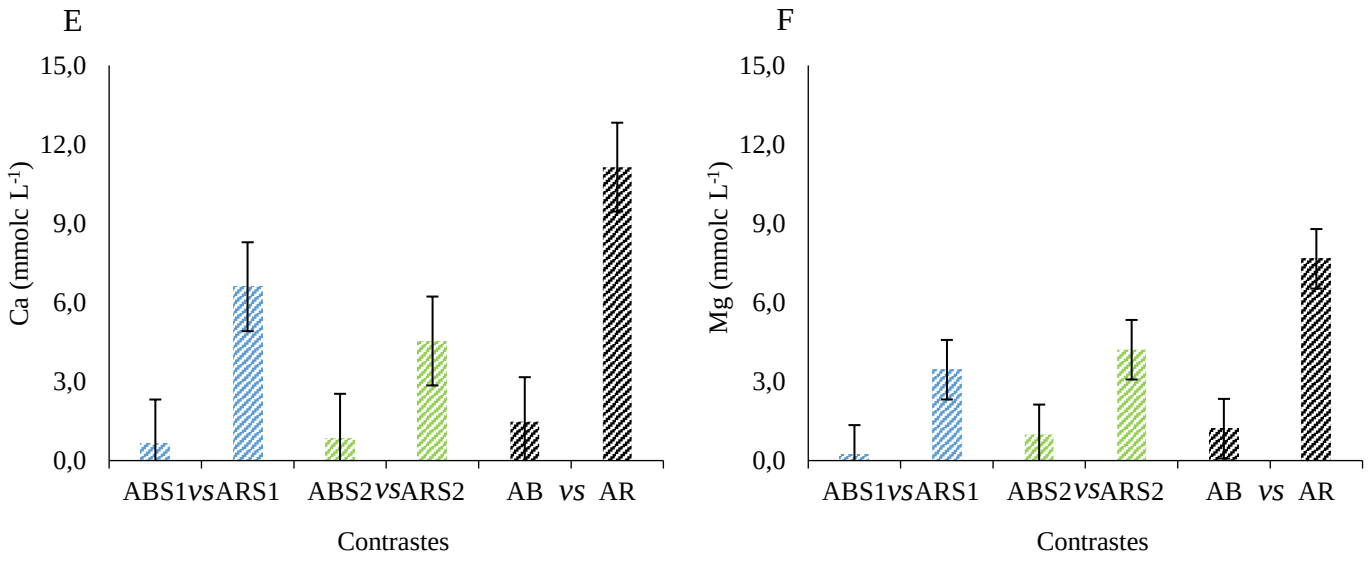
Analisando-se as Figuras 5C e 5D, em ambas se observou efeito significativo para os íons Na e K ($p<0,01$), representando aumento desses elementos nos solos quando irrigado com água residuária com acréscimos para Na de 804,11%, 1064,07% e 935,53% em relação a água de abastecimento, respectivamente. Para o íon K, observou-se acréscimo de 1500%, 892,40% e 1042,85%, respectivamente.

Comportamento semelhante obteve-se para os íons Ca e Mg, observando efeito significativo ($p<0,01$), com acréscimos no solo ao irrigar com água residuária em comparação a água de abastecimento, da ordem de 947,62%, 434,12% e 652,70% para íon Ca e 1468,18%, 321% e 533,05% para íon Mg.

Altas concentrações de sais solúveis e o íon sódio representam uma grande ameaça para a agricultura, pois, segundo Ribeiro (2010), a acumulação de sais na rizosfera prejudica o crescimento e desenvolvimento das culturas, provocando um decréscimo de produtividade e, em casos mais severos, pode levar a um colapso da produção agrícola. Isto ocorre em razão da diminuição do potencial osmótico da solução do solo, por efeitos tóxicos dos íons específicos e alteração das condições físicas e químicas do solo.

Figura 5. Teste de contraste para CEes (A), RAS (B) e teores de Na (C), K (D) Ca (E) Mg (F) nos solos irrigado com água de abastecimento versus água residuária no solo 1 (ABS1, ARS1), com água de abastecimento versus água residuária no solo 2 (ABS2, ARS2) e apenas os tipos de água (AB, AR) aos 80 DAS. (**) Significativo a 0,01 e 0,05 de probabilidade pelo teste F.





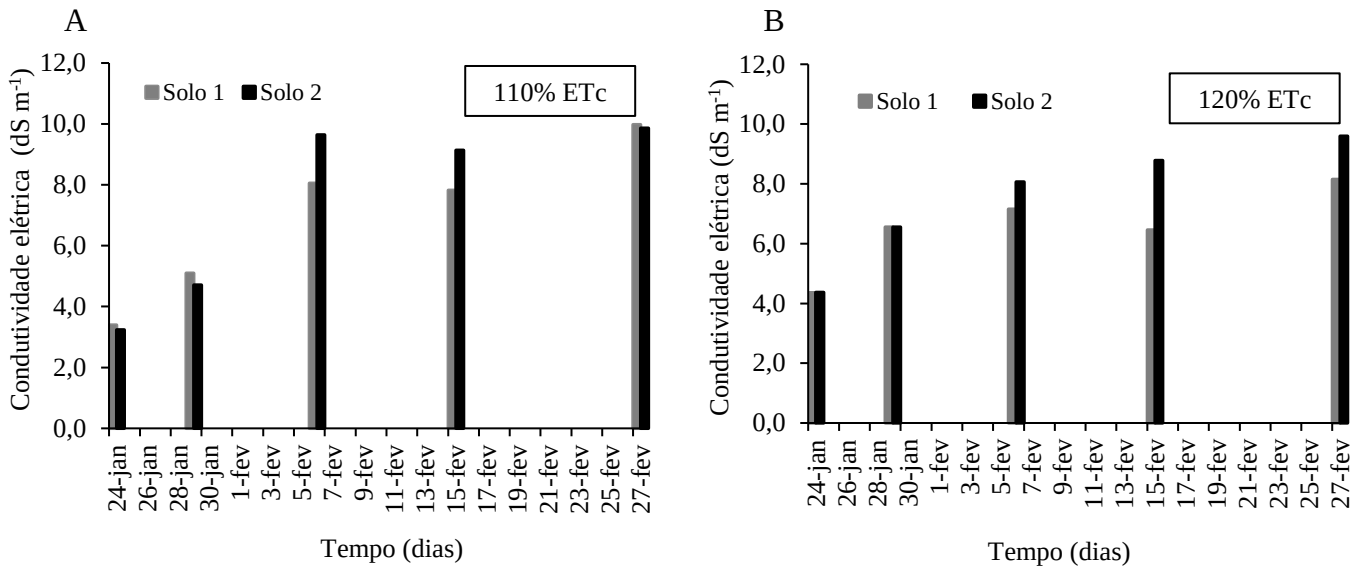
3.4 Monitoramento do material lixiviado

Verificou-se na Figura 6A que a condutividade elétrica do material lixiviado apresentou variação entre os solos observados, se destacando na maioria das épocas observadas o solo 1 (Planossolo Háplico) com maiores valores médios 3,40; 5,10 e 9,98 dS m^{-1} referente ao início e final de observação do lixiviado. Em relação ao solo 2, os maiores valores de condutividade elétrica foram encontrados na época intermediária atingindo 9,65 dS m^{-1} e 9,14 dS m^{-1}.

Na Figura 6B, observou-se que a maioria das épocas analisadas apresentaram maior condutividade elétrica da água drenada no solo 2 (Neossolo Regolítico), com valores médios variando entre 4,37 a 9,60 dS m^{-1}.

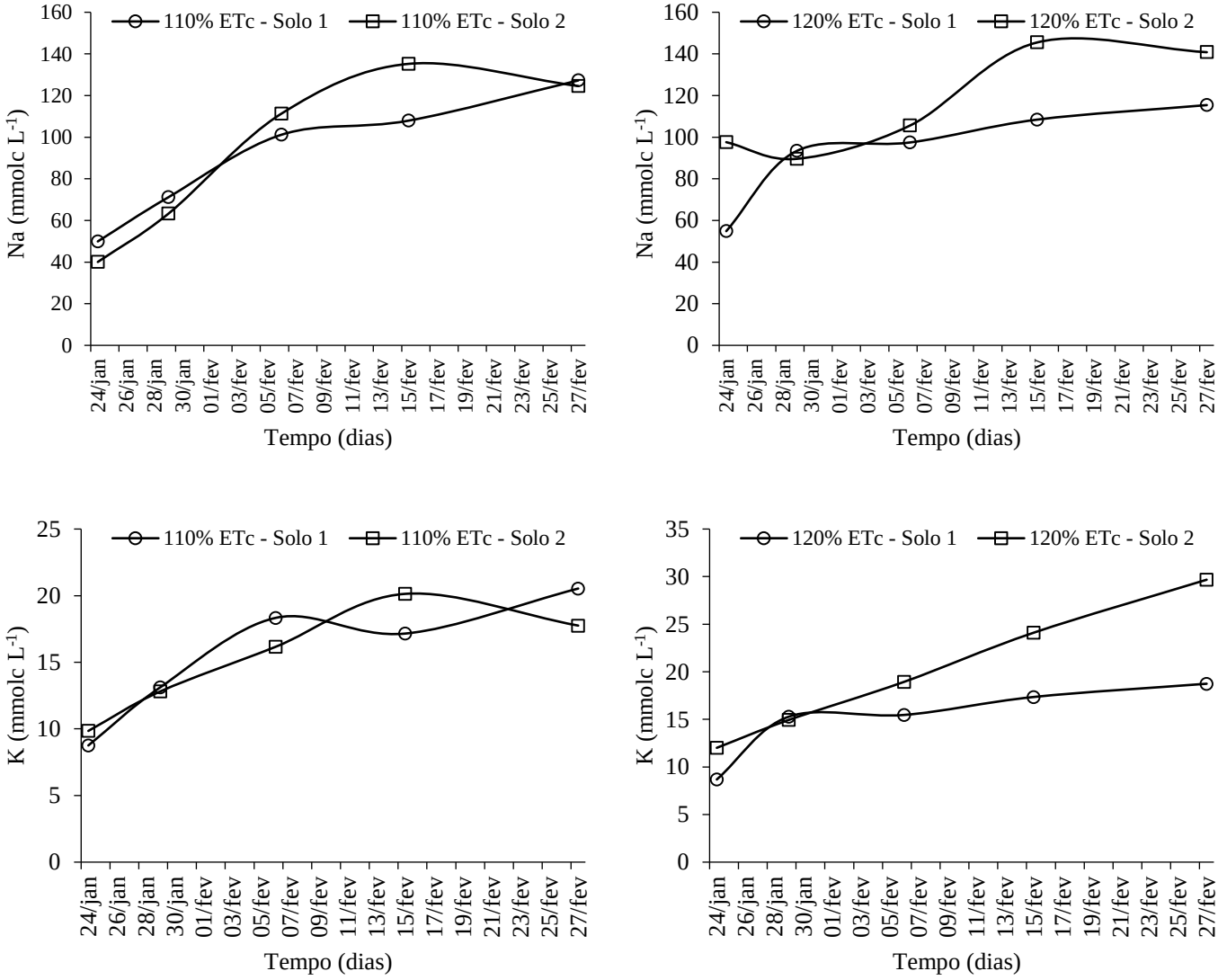
Em ambos os tipos de solos analisados, os altos valores da condutividade elétrica da água drenada ocorreram devido a contribuição das lâminas aplicadas na irrigação com água residuária, que apresentava valor de CEes de 5,0 dS m^{-1}. Observou-se a partir da segunda época de avaliação que a maioria dos tratamentos com lâminas de 120% da ETc apresentaram menor condutividade elétrica da água drenada, isto ocorreu devido ao fato de se aplicar uma lâmina de irrigação maior, o que promoveu uma maior dissolução de sais, além de favorecer uma maior absorção de nutrientes pela planta, resultando em menor condutividade elétrica.

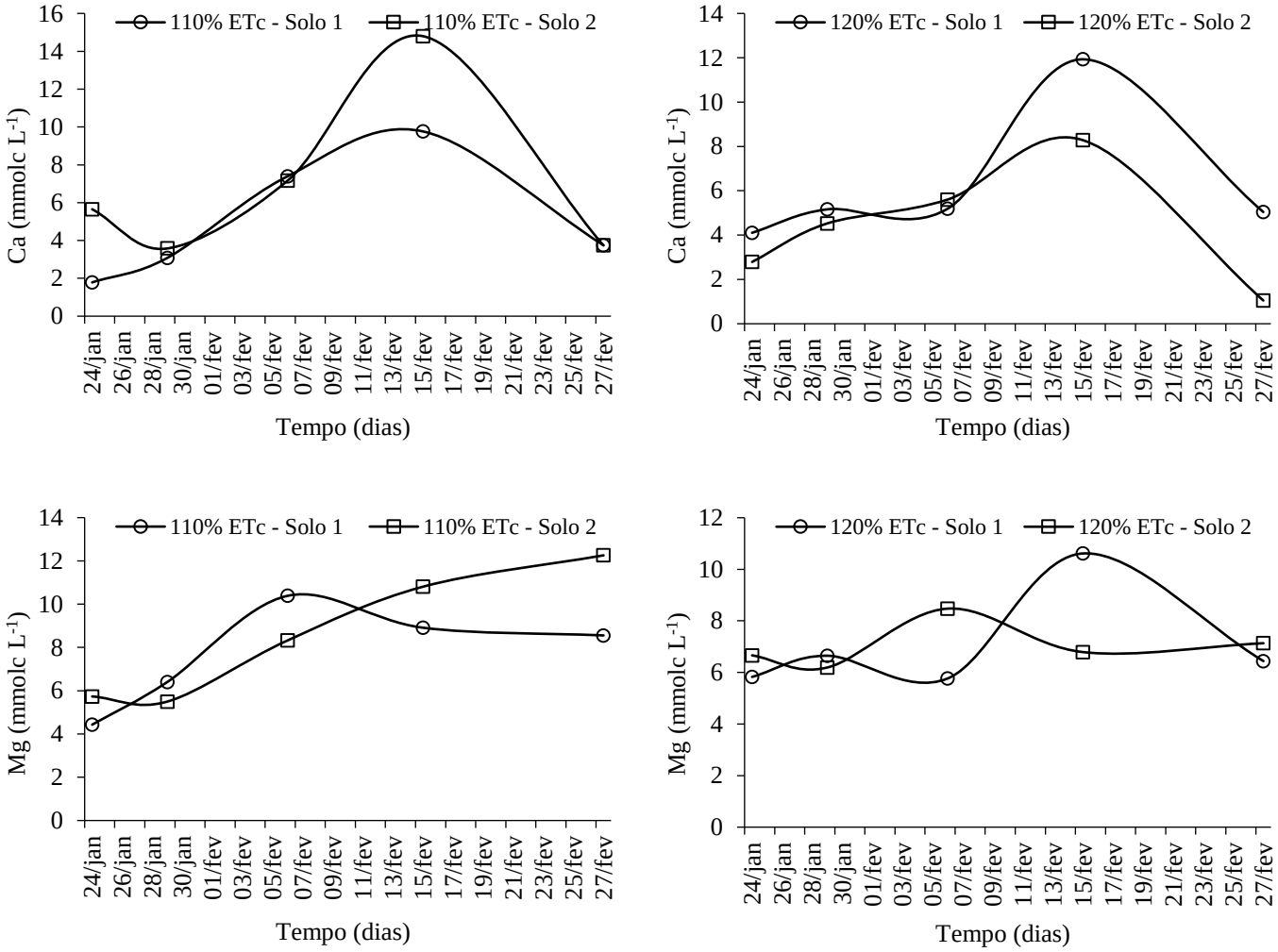
Figura 6. Variação temporal da condutividade elétrica da água drenada nos tratamentos 110% (A) e 120% (B) da ETc, no solo 1 (Planossolo Háplico) e solo 2 (Neossolo Regolitico).



Em relação a concentração de sais Na, K, Ca e Mg na água drenada (Figura 7) observou-se, de maneira geral, que para maioria dos elementos em ambos tratamentos, o solo 2 apresentou maiores concentrações de sais nas épocas analisadas, exceto para o íon cálcio que na maioria das épocas de análise apresentou no tratamento 120% da ETc uma maior concentração no solo 1, sendo encontrado um valor máximo de 8,3 mmolc L^{-1} no solo 1 e 11,93 mmolc L^{-1} no solo 2, fato que pode ter ocorrido devido à maior a concentração do nutriente na solução do solo possibilitando uma maior chance dele ser perdido por lixiviação.

Figura 7. Variação temporal das concentrações de sódio, potássio, cálcio e magnésio da água drenada nos tratamentos 110 e 120% da ETc em Planossolo Háplico (Solo 1) e Neossolo Regolítico (Solo 2).





O elemento mais lixiviado foi o sódio em ambos tipos de solos e tratamentos, fato devido ao mesmo ser bastante móvel no solo e se encontrar em maior quantidade na água de irrigação. Em se tratando dos elementos essenciais analisados, percebe-se também que o potássio foi o que apresentou maiores perdas, isto devido ao mesmo participar na composição química da água utilizada na irrigação numa concentração maior em relação a Ca^{2+} e Mg^{2+}. As perdas de lixiviação de potássio estão relacionadas com a concentração solução do solo e do excesso de água para que ocorra o seu carreamento para camadas mais profundas (Mielniczuk, 2005). Analisando os três elementos essenciais: cálcio, magnésio e potássio, a maior mobilidade é do íon K^+, seguido do Mg^{2+} e o menos móvel é o Ca^{2+} (Benites, 2009). Assis (2018) avaliando o transporte de solutos em colunas de solo verificaram que o K^+ foi lixiviado pelo menos 70% da concentração inicial aplicada.

4.0 CONCLUSÕES

A aplicação de água residuária de esgoto doméstico tratado provocou alterações químicas nos teores dos trocáveis: P, Na, K, Ca no Planossolo Háplico, exceto para o Mg.

A irrigação com lâminas sob déficit hídrico provocou aumento nos teores de Na^+ e CEes no solo, refletindo diretamente na RAS e PST de ambos os solos estudados, sendo necessário um monitoramento dessas variáveis após o período chuvoso, de forma a manter a sustentabilidade do cultivo quando se utiliza com esses tipos de águas.

A irrigação com água residuária de origem de efluentes domésticos proporcionou uma tendência de aumento nos teores dos solúveis: Na^+, K^+, Mg^{2+} em Neossolo Regolítico, refletindo diretamente na salinidade do solo (CEes).

A irrigação com água residuária possibilitou o aumento dos sais trocáveis e solúveis do solo em comparação quando irrigado com água de abastecimento, exceto para os íons trocáveis Ca e Mg.

O uso de lâminas de irrigação superior a 100% da ETc mostrou-se eficiente na remoção dos sais de Na e K principalmente em Neossolo Regolítico das camadas de solo em que foi explorado pelo sistema radicular do milho.

As lâminas de lixiviação promoveram reduções significativas dos sais em ambos solos estudados, diminuindo os riscos de salinização e sodificação.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, H. C.; SILVEIRA, C. B.; ERNANI, P. R.; CAMPOS, M. L. E.; ALMEIDA, D. Composição química de um resíduo alcalino da indústria de papel e celulose (Dregs). **Química Nova**, v.30, p.1669-1672, 2007.

ANDRADE FILHO, J. A.; SOUSA NETO, O. N.; DIAS, N. S.; NASCIMENTYO, I. B.; MEDEIROS, J. F.; COSME, C. R. Atributos químicos de solo fertirrigado com água residuária no semiárido brasileiro. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 661-674, 2013.

APHA - American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19.ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 1995. 1134p.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p. 711-728, 2014.

BARROS, A. H. C. **Agência Embrapa de Informação Tecnológica: Árvore do conhecimento – Território Mata Sul Pernambucana – Clima**. 2011. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/território-mata-sul-pernambucana/arvore.Acesso em: 12 de Junho de 2019.

BENITES, V.M.; CARVALHO, M.C.; RESENDE, A.V.; POLIDORO, J.C.; BERNARDI, A.C.C.; OLIVEIRA, F.A. O potássio, o cálcio e o magnésio na agricultura Brasileira. In: Prochnow, L.I.; Casarin, V. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes.** Distrito Federal, 2009. Cap. 16, p. 100-130.

BERTOL, O. J.; RIZZI, N. E.; FAVARETTO, N.; LANA, M. C. Phosphorus loss by surface runoff in no-till system under mineral and organic fertilization. **Scientia Agrícola**, v.67, p.71-77, 2010.

BOND, W.J. Effluent irrigation – an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, p.543-555, 1998.

BOUWER, H.; CHANEY, R.L. Land treatment of wastewater. **Advances in Agronomy**, v.26, p.133-176, 1974.

CAOVILLA, F. A.; SAMPAIO, S. C.; SMANHOTTO, A. NÓBREGA, L. H. P.; QUEIROZ, L. M. F.; GOMES, B. M. Características químicas de solo cultivado com soja e irrigado com água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,** v.14, n.7, p.692–697, 2010.

CAVALCANTI, F. J. A.; SANTOS, J. C. P; PEREIRA, J. R.; LEITE, J. P.; SILVA, M. C. L.; FREIRE, F. J.; SOUSA, A. R.; MESSIAS, A. S.; FARIA, C. M. B.; BURGOS, N.; LIMA JUNIOR, M. A.; GOMES, R. V.; CAVALCANTI, A. C.; LIMA, J. F. W. F. **Recomendações de adubação para o Estado de Pernambuco**. 2ª Aproximação. Recife – Instituto Agronômico de Pernambuco – IPA, 2008. 212p.

BONINI, M. A.; SATO, L. M.; BASTOS, R. G.; SOUZA, C. F. Alterações nos atributos químicos e físicos de um Latossolo Vermelho irrigado com água residuária e vinhaça. **Revista Biociências**, v. 20, n. 1, p. 56-63, 2014.

DANTAS, I. L. A.; FACCIOLI, G. G.; MENDONÇA, L. C.; NUNES, T. P.; VIEGAS, P. R. A.; SANTANA, L. O. G. Viabilidade do uso de água residuária tratada na irrigação da cultura do rabanete (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ambiente & Água**. v.9, n.1, 2014.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. revisada e ampliada, Brasília -DF: Embrapa, 2017. 574 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília, Informação Tecnológica, 2009. 628p.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.35, n.6, p.1039-1042, 2011.

FEITOSA, S. O.; SILVA, S. L.; FEITOSA, H. O.; CARVALHO, C. M.; FEITOSA, E. O. Crescimento do feijão caupi irrigado com diferentes concentrações efluente tratado e água salina. **Revista AGROTEC**, v.36, n. 1, p.146-155, 2015.

FONSECA, A. F.; HERPIM, U.; PAULA, A. M.; VICTÓRIA, R. L.; MELFI, A.J. Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil. **Scientia Agricola,** v.64, p.194-209, 2007.

GLOAGUEN T. V.; FORTI, M. C.; LUCAS, Y.; MONTES, C. R.; GONÇALVES, R. A. B.; HERPIN, U.; MELFI, A. J. Soil solution chemistry of a Brazilian Oxisol irrigated with treated sewage effluent. **Agricultural Water Management.** v.88, p.119-131. 2007.

JNAD, I.; LESIKAR, B.; KENIMER, A.; SABBAGH, G. Subsurface drip of residential effluent: I. soil chemical characteristics. **Transaction of the ASAE**, v.44, p.1149-1157, 2001.

LEAL, R.M.P.; HERPIN, U.; FONSECA, A.F.; FIRME, L.P.; MONTES, C.R.; MELFI, A.J. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. **Agricultural Water Management**, v.96, p.307-316, 2009.

MALAFAIA, G.; RODRIGUES, A. S. DE L.; ARAÚJO, F. G. DE.; LEANDRO, W. M. Teor de nutrientes em folhas de milho fertilizado com vermicomposto de lodo de curtume e irrigado com água residuária doméstica. **Revista Ambiente e Água**, v.10, n.4, p.801-809, 2016.

MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; PÉREZ-MARIN, A. M.; SOARES, F. A. L.; FERNANDES, P. D. Características químicas do solo sob algodoeiro em área que recebeu água residuária da suinocultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, n. 03, p.1047-1055, 2011.

MEDEIROS, J. C.; ALBUQUERQUE, J. A.; MAFRA, A. L.; BATISTELLA, F.; GRAH, J. Calagem superficial com resíduo alcalino da indústria de papel e celulose em um solo altamente tamponado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.1657-1665, 2009.
MEURER, E. J. 2010. **Fundamentos de Química do Solo**. 4. ed. Porto Alegre: Evangraf, 266p.

MIELNICZUK, J. 2005. **Manejo conservacionista da adubação potássica**. In: YAMADA, T.; ROBERTS, T. L. (Ed.). Potássio na agricultura brasileira. Piracicaba: Potafos, p.165-178.

MONTEIRO, D. R.; SILVA, T. T. S.; SILVA, L. V. B. D.; LIMA, V. L. A.; SANTOS, C. L. M.; PEARSON, H. W. efeito da aplicação de efluente doméstico tratado nos teores de micronutrientes no solo. **Irriga**, v. Especial, n. Especial, p. 40-46, 2014.

NASCIMENTO, J. DOS S.; FIDELES FILHO, J. Crescimento, produção e alterações químicas do solo em algodão irrigado com água de esgotos sanitários tratados. **Revista Caatinga**, v.28, n.2, p.36 – 45, 2015.

OLIVEIRA, A. M. P.; REBOUÇAS, C. A. M.; DIAS, N. S.; PORTELA, J. C.; DINIZ, A. A. Contamination potential of specific ions in soil treated with reject brine from desalination plants. **Revista Caatinga**, v.29, n. 3, p.569-577, 2016.

PEREIRA, B. F. F.; HE, Z. L.; SILVA, M. S.; HERPIN, U.; NOGUEIRA, S. F.; MONTES, C. R.; MELFI, A. J. Reclaimed wastewater: Impact on soil-plant system under tropical conditions. **Journal of Hazardous Materials,** v.192, p.54-61, 2011.

PINTO, M. C. K.; CRUZ, R. L.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M. S.; HERMES, E. Contaminação das águas subterrâneas por nitrogênio devido à irrigação com efluente do tratamento de esgoto. **Irriga**, v.18, p.270-281, 2013.

RIBEIRO, M. R. Origem e Classificação dos Solos Afetados por Sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (Eds.). **Manejo da Salinidade na Agricultura:** Estudos Básicos e Aplicados. Fortaleza, INCTSal. 2010, p.11-19.

RICHARDS, L. A. 1954. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.** Washington: United States Salinity Laboratory, 160p. USDA. Agiculture Handbook, 60.

SANTOS, C. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, M. A. L.; PEDROSA, E. M. R. Evapotranspiração e coeficientes de cultura da *moringa oleifera* em condições semiáridas em Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.21, n.12, p.840-845, 2017.

SILVA, J. G. D.; CARVALHO, J. J.; LUZ, J. M. R.; SILVA, J. E. C. Fertigation with domestic wastewater: uses and implications. **African Journal of Biotechnology,** Nairobi, v.15, n.20, p. 806-815, 2016.

SILVA, L. L.; CARVALHO, C. M.; SOUZA, R. P. F.; FEITOSA, H. O.; FEITOSA, S. O.; FILHO, R. R. G. Utilização de efluentes domésticos no crescimento da pimenta (C*apsicum chinense*), cultivar tequila bode vermelha. **Revista Agrotec**, v. 35, n. 1, p.121-133, 2014.

STEWART, H. T. L.; HOPMANS, P.; FLINN, D.W. Nutrient accumulation in trees and soil following irrigation with municipal effluent in Australia. **Environmental Pollution**, v.63, p.155-177, 1990.

URBANO, V. R.; MENDONÇA, T. G.; BASTOS, R. G.; SOUZA, C. F. Physical-chemical effects of irrigation with treated wastewater on Dusky Red Latosol soil. **Revista Ambiental & Água,** v.10, n. 4, p.737-748, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante dos resultados obtidos, algumas considerações podem ser apreciadas:

1. A irrigação da cultura do milho com concentrações de 65 a 70% de AR garante obtenção de altas produtividades, otimizando o manejo de irrigação, sendo uma alternativa de geração de renda para os produtores de milho da região semiárida de Pernambuco;
2. O modelo Hydrus-1D foi capaz de simular com bom desempenho a dinâmica de umidade nos solos Argissolo e Planossolo ao longo do tempo, para as diferentes condições de cobertura na profundidade de 20 cm e realizar previsões de cenários voltados para manejo de irrigação. Logo, incentiva-se sua utilização para maiores profundidades de solo, de modo que possa avaliar de forma mais detalhada a umidade do solo e sua relação com os cultivos, e conduzir análises de diferentes cenários de irrigação;
3. A aplicação de lâminas de 100% de ETc supre nutricionalmente a cultura do milho em Neossolo Regolítico, de modo que, pesquisas voltadas para validação desses indícios são sugeridas;
4. O status hídrico do solo e da planta aumenta com a disponibilidade de água no solo, possibilitando que maiores lâminas de irrigação reduzam os efeitos deletérios ocasionados pelos sais presentes na água residuária;
5. A utilização de lâminas sob déficit hídrico e excedente hídrico com água residuária provoca redução nas trocas gasosas, indicando a utilização de lâminas superiores a 100% da ETc. As variáveis analisadas da fluorescência da clorofila reduzem com aumento das lâminas de reposição da ETc, sendo um indicativo de estresse abiótico, indicando a utilização de lâminas superiores a 90% da ETc;
6. A utilização de efluentes domésticos é uma alternativa viável para ser utilizada na agricultura, entretanto é necessário a adoção de manejos como o rodízio de áreas, como também o sistemático monitoramento das características do solo, de forma a incrementar a sustentabilidade dessa alternativa, minimizando assim os efeitos deletérios de salinidade e sodicidade decorrente da irrigação com água residuária;
7. Em novas pesquisas, sugere-se a utilização de tratamentos com maiores quantidades de lâminas de irrigação, de forma a aprimorar a estimativa da lâmina ótima que minimize os efeitos deletérios de salinidade e sodicidade no solo.

8. Recomenda-se a utilização da lâmina de 100% da ETc como sendo a lâmina ideal para o bom desenvolvimento do milho, sem causar danos à cultura, nem ao solo.