



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ELIAKIM MARTINS ARAÚJO

**CONTRIBUIÇÃO POR ASCENSÃO CAPILAR EM DIFERENTES NÍVEIS DO
LENÇOL FREÁTICO AO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA ALFACE**

FORTALEZA

2017

ELIAKIM MARTINS ARAÚJO

CONTRIBUIÇÃO POR ASCENSÃO CAPILAR EM DIFERENTES NÍVEIS DO LENÇOL
FREÁTICO AO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA ALFACE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A688c Araújo, Eliakim Martins.
Contribuição por ascensão capilar em diferentes níveis do lençol freático ao desenvolvimento da cultura da alface / Eliakim Martins Araújo. – 2017.
69 f. : il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa.

1. Drenagem agrícola. 2. Lençol freático. 3. Cultura da alface. I. Título.

CDD 630

ELIAKIM MARTINS ARAÚJO

CONTRIBUIÇÃO POR ASCENSÃO CAPILAR EM DIFERENTES NÍVEIS DO LENÇOL
FREÁTICO AO DESENVOLVIMENTO DA CULTURA DA ALFACE

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Agrícola, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

Aprovado em: 31/03/2017.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Alexsandro Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Carlos Henrique Carvalho de Sousa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Wlisses Matos Maciel
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Iguatu

Prof. Dr. Alexandre Reuber Almeida da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Iguatu

Meu senhor Deus, em tudo tu és bom, por isso
dedico este trabalho em tua honra!

AGRADECIMENTOS

A ti senhor Deus, pelo dom da vida, por me guiar no caminho do conhecimento, do trabalho, por me dar forças e me manter firme até nos momentos mais complicados.

À toda minha família, em especial, aos meus dois irmãos, Efraim e Erika, e ao meu pai, Lucimi, fonte de todo amor que tenho vivenciado em minha vida, meus espelhos, minhas referências mais profundas, o meu muito obrigado.

Ao meu brilhante orientador, prof. Dr. Raimundo Nonato Távora Costa que esteve ao meu lado, aconselhando, apoiando, que me permitiu concluir este trabalho, mesmo diante de várias adversidades, o meu muito obrigado.

Às instituições públicas, UFC e CAPES, que deram o suporte, intelectual e financeiro, durante toda essa jornada.

Aos professores, colegas e amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao amigo Éder Ramon, companheiro desde os tempos do laboratório de Geoprocessamento em Iguatu e amigo de todas as horas.

A todas as pessoas, alunos, funcionários que de uma maneira ou de outra colaboraram com o desenvolvimento deste trabalho.

O meu mais sincero obrigado!

“Todos veem o que pareces, poucos percebem o que és.” Nicolau Maquiavel

RESUMO

A pesquisa teve como premissa que a taxa de ascensão capilar oriunda do lençol freático seria capaz de suprir as necessidades hídricas da cultura e teve como objetivo geral obter, utilizando-se as cultivares de alface americana Lucy Brow e Gloriosa, informações que identifiquem as relações de resposta da cultura às taxas de ascensão capilar e aos níveis de profundidade do lençol freático. Especificamente, a pesquisa buscou avaliar, a partir de variáveis de produção, a resposta das cultivares a níveis de profundidade do lençol freático; calcular os valores de SEW_{30} para as profundidades do lençol freático estabelecidas em determinado intervalo e estabelecer relações de produtividade da cultura a estes níveis de estresse por excesso de água, além de fornecer informações relativas às taxas de ascensão capilar oriundas de seis profundidades do lençol freático e analisar com base nas necessidades hídricas da cultura. O experimento foi instalado em um modelo físico de lisímetros de drenagem, os quais permitem, através de piezômetros, o controle do nível do lençol freático a partir de um sistema de entrada d'água alimentado por uma caixa d'água e de saída através de drenos. Para os tratamentos foram utilizados sete lisímetros, sendo que em seis deles a única oferta hídrica à cultura ocorria através de ascensão capilar oriunda do lençol freático às profundidades de 0,10m; 0,15m; 0,20m; 0,25m; 0,30m e 0,35m e apenas um lisímetro com irrigação e ausência de lençol freático. Diariamente, além do monitoramento dos níveis de lençol freático, foram coletadas informações de tensão de água no solo através de tensiômetros, e realizados os tratamentos culturais necessários ao desenvolvimento da cultura. Os resultados demonstraram que o nível de lençol freático mantido a 0,20m da superfície do solo foi capaz de suprir a demanda hídrica da cultura da alface em um solo arenoso. Os níveis do lençol freático se mostraram significativos em nível de 1% ao se analisar dados de produtividade, fotossíntese, transpiração, condutância estomática e eficiência do uso da água pela cultura. Os dados de produtividade da cultura relacionados ao índice de estresse por excesso de água SEW_{30} demonstraram que o estresse por déficit de água foi mais limitante que o estresse por excesso de água. Estes resultados permitiram as seguintes conclusões: - A relação física fator-produto sinaliza para um lençol freático a 0,20m como a opção mais viável em termos de resposta da cultura; - No cultivo da alface americana para condições de excesso de água no solo deve-se dar preferência ao estabelecimento da cultivar Gloriosa em detrimento da cultivar Lucy Brow; - Os elevados valores de densidade de fluxo permitiram corroborar com a premissa da tese, ou seja, foram capazes de suprir as necessidades hídricas da cultura ao longo do seu ciclo.

Palavras-chave: *Lactuca sativa* L. Necessidade hídrica. Franja capilar.

ABSTRACT

The research had as premise that the rate of capillary rise from the groundwater table would be able to supply the water needs of the culture and had as general objective to obtain, using the American lettuce cultivars Lucy Brow and Gloriosa, information that identifies the relations of response to capillary rise rates and depth levels of the groundwater. Specifically, the research sought to evaluate, from production variables, the response of the cultivars to depth levels of the water table; to calculate the SEW₃₀ values for the groundwater depths established in a given interval and to establish crop productivity ratios at these water stress levels, as well as to provide information on the capillary rise rates from six depths of the groundwater table and based on the water needs of the crop. The experiment was installed in a physical model of drainage lysimeters, which allow, through piezometers, the control of the water table level from a water inlet system fed by a water box and output through drains. For the treatments, seven lysimeters were used, and in six of them the only hydric supply to the crop occurred through capillary rise from the groundwater to the depths of 0.10 m; 0.15 m; 0.20 m; 0.25 m; 0.30 m and 0.35 m and only a lysimeter with irrigation and absence of water table. Daily, in addition to the monitoring of groundwater levels, water tension information was collected in the soil through tensiometers, and the necessary cultural treatments were carried out for the development of the crop. The results showed that the level of groundwater kept at 0.20 m from the soil surface was able to supply the water demand of the lettuce crop in sandy soil. The levels of the water table were significant at 1% level when analyzing data on productivity, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and efficiency of water use by the crop. The crop productivity data related to the SEW₃₀ excess water stress index showed that water deficit stress was more limiting than water excess stress. These results allowed the following conclusions: - The physical factor-product relationship signals to a water table at 0,20 m as the most viable option in terms of crop response; - In the cultivation of American lettuce for conditions of excess water in the soil should be given preference to the establishment of the cultivar Gloriosa to the detriment of the cultivar Lucy Brow; - The high values of flow density allowed to corroborate with the premise of the thesis, that is, they were able to supply the water needs of the crop during its cycle.

Keywords: *Lactuca sativa* L. Crop requirement. Capillary fringe.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vista lateral (A) e superior (B) dos lisímetros de drenagem utilizados na pesquisa	25
Figura 2 – Detalhe dos piezômetros existentes na parede frontal externa em cada lisímetro	26
Figura 3 – Incorporação do composto orgânico para formação do substrato	27
Figura 4 – Germinação dois DAS com elevado percentual de germinação sete DAS	28
Figura 5 – Croqui do delineamento experimental	30
Figura 6 – Permeâmetro de carga constante com frasco de Mariotte	32
Figura 7 – Medição da taxa fotossintética com o IRGA (LICOR 6400XT, USA)	35
Figura 8 – Produtividade das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático	39
Figura 9 – Transpiração em cultivares de alface em função de níveis do lençol freático	40
Figura 10 – Condutância estomática das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático	41
Figura 11 – Relação entre a condutância estomática e o índice de estresse hídrico em duas cultivares de alface	42
Figura 12 – Fotossíntese em cultivares de alface em função de níveis do lençol freático ..	43
Figura 13 – Fotossíntese em cultivares de alface em função do índice SEW30	44
Figura 14 – Transpiração em cultivares de alface em função de níveis do lençol freático	45
Figura 15 – Transpiração em cultivares de alface em função do índice SEW30	45
Figura 16 – Eficiência do uso da água das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático	46
Figura 17 – Relação entre a eficiência do uso da água e o índice de estresse hídrico em duas cultivares de alface	46

Figura 18 – Dados de precipitação e evapotranspiração máxima (ET _m) da cultura	48
Figura 19 – Lâmina de água no solo (LAS) e capacidade de água disponível (CAD) em função dos níveis de profundidade do lençol freático	52
Figura 20 – Comportamento dos potenciais mátricos e de pressão para a profundidade de 0,20m em cada um dos níveis de lençol freático para o período monitorado	52
Figura 21 – Comportamento do teor de água no solo para a profundidade de 0,20m em cada um dos níveis de lençol freático para o período monitorado	53
Figura 22 – Potencial total de água no solo para o período monitorado	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria e classe textural do solo utilizado nos lisímetros de drenagem	27
Tabela 2 – Atributos físicos da areia utilizada na composição do substrato colocado nos lisímetros de drenagem (Fortaleza, CE, 2013)	27
Tabela 3 – Análise de variância das variáveis-resposta produtividade, condutância estomática, eficiência do uso da água, fotossíntese e transpiração	37
Tabela 4 – Aplicação dos modelos de regressão do programa SAEG a diferentes variáveis de produção para duas cultivares de alface	38
Tabela 5 – Dados obtidos através da Estação Agroclimatológica para o período monitorado (21/09/2016 – 06/10/2016)	49
Tabela 6 – Potenciais mátricos e de pressão (cm de água) a 0,20m para os seis níveis do lençol freático	50
Tabela 7 – Parâmetros empíricos e atributos físicos do solo para o modelo van Genuchten	51
Tabela 8 – Conteúdo de água no solo (cm ³ cm ⁻³) a 0,20m para os seis níveis do lençol freático	51
Tabela 9 – Potenciais de pressão e mátricos de água no solo (cm H ₂ O) nas profundidades de 0,10m e 0,30m para os seis níveis de profundidade do lençol freático	54
Tabela 10 – Potenciais totais de água no solo (cm H ₂ O) nas profundidades de 0,10m e 0,30m para os seis níveis de profundidade do lençol freático	55
Tabela 11 – Gradientes de potencial total da água no solo (cm cm ⁻¹) entre as profundidades de 0,10m e 0,30m da superfície do solo	56
Tabela 12 – Condutividade hidráulica do solo K(θ) em mm dia ⁻¹ a 0,20m para os seis níveis do lençol freático	57
Tabela 13 – Densidade de fluxo em mm dia ⁻¹ para os seis níveis do lençol freático	58

Tabela 14 – Produtividade das cultivares de alface (kg ha ⁻¹) em função dos níveis do lençol freático	68
Tabela 15 – Condutância estomática das cultivares de alface (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) em função dos níveis do lençol freático	68
Tabela 16 – Taxa de fotossíntese (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹) em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático	69
Tabela 17 – Taxa de transpiração (mmol m ⁻² s ⁻¹) em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático	69
Tabela 18 – Eficiência do uso da água em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Movimento e quantificação da água no solo.....	16
2.2	Níveis de lençol freático e resposta das culturas.....	18
2.3	Resposta das culturas ao fluxo por ascensão capilar.....	19
2.4	A cultura da alface.....	21
2.5	Índices de estresse por excesso de água no solo.....	22
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	25
3.1	Caracterização do modelo físico do experimento.....	25
3.2	Instalação e condução do experimento.....	26
3.3	Delineamento experimental.....	29
3.4	Estimativa da densidade de fluxo oriunda da ascensão capilar.....	30
3.4.1	<i>Condutividade hidráulica do solo não saturado - $K(\theta)$</i>	30
3.4.2	<i>Gradiente de potencial total</i>	32
3.5	Curva de retenção de água no solo.....	33
3.6	Monitoramento das tensões de água no solo.....	33
3.7	Soma do excesso de água associado aos níveis do lençol freático.....	34
3.8	Variáveis de produção da cultura da alface.....	35
3.9	Análises estatísticas.....	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1	Resposta das cultivares de alface em função dos níveis do LF e SEW ₃₀	37
4.2	Demanda de água da cultura da alface no período do experimento.....	48
4.3	Potenciais e teores de água no solo para níveis de profundidade do LF.....	49
4.4	Densidade de fluxo por ascensão capilar oriunda do lençol freático.....	53
5	CONCLUSÕES.....	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A - VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DAS CULTIVARES.....	66

1 INTRODUÇÃO

O conhecimento detalhado da dinâmica da água na relação solo-planta-atmosfera durante o desenvolvimento de uma espécie vegetal fornece elementos essenciais para o estabelecimento ou aprimoramento de práticas de manejo agrícola, que visam à otimização da produtividade. A água é fator fundamental no desenvolvimento de uma cultura, afetando, principalmente, o desenvolvimento do sistema radicular, a absorção e translocação de nutrientes pelas plantas. Sua dinâmica tem sido estudada através de balanços hídricos, baseados principalmente em informações obtidas na atmosfera, deixando para um segundo plano informações edáficas (REICHARDT *et al.*, 1993).

As respostas dos cultivos agrícolas ao estresse por excesso hídrico estão associadas ao conteúdo interno de água no solo. Embora sejam conhecidos os efeitos desse fator, são poucos os resultados práticos.

O movimento da água no solo é apontado como um dos processos mais importantes no desenvolvimento dos cultivos agrícolas. Tamanha importância é justificada pela complexidade atribuída na tentativa do entendimento e descrição das componentes desse processo. Muitas vezes nas áreas agrícolas em que o lençol freático, é relativamente superficial, o aporte fornecido por este ao desenvolvimento das culturas é desprezado, ao ponto de acarretar problemas relacionados ao excesso de água no solo. Sá (2005) afirma que, de uma maneira geral, para que as plantas se desenvolvam, há a necessidade de um ponto de equilíbrio entre a quantidade de água disponível e o espaço ocupado pelo ar no solo.

Apesar dos poucos trabalhos desenvolvidos nessa temática, existem estudos (COELHO FILHO *et al.*, 2011; KIRKHAM, 2005; SOUZA, *et al.*, 1999) considerados conceituais e que trazem modelos matemáticos capazes de se aproximarem da descrição e quantificação da complexa interação água-solo-planta-atmosfera.

O solo ocupa um destaque nesse processo, pois além de ser o local que abriga o desenvolvimento dos processos de transferência de água no sistema solo-planta-atmosfera, possui características e atributos físico-hídricos bastante difundidos.

Pesquisas básicas têm sido conduzidas com o intuito de determinar as respostas das plantas aos baixos níveis de água no solo; todavia, existe uma lacuna na literatura de trabalhos que visem a um melhor entendimento da resposta das plantas às condições de excesso de água no solo. Por essa razão, pesquisas específicas que forneçam orientações confiáveis sobre a tolerância das culturas ao excesso de água no solo são particularmente necessárias, tendo em

vista que eventos de chuvas frequentes causam flutuações do lençol freático próximo à superfície do solo.

Na literatura, existe uma escassez de estudos para as condições do nordeste brasileiro relacionado aos efeitos da profundidade do lençol freático sobre o desempenho agrônômico dos cultivos. Embora experimentos de laboratório e de campo tenham sido conduzidos nesse sentido em outras regiões, a transferência desses resultados de uma localidade para outra não é recomendável, tendo em vista as condições edafoclimáticas específicas de cada local. As máximas produtividades das culturas estão associadas a uma profundidade ótima do lençol freático, e tal profundidade ótima depende do tipo de solo, genótipo, clima e irrigação.

Cabe destacar o elevado potencial de áreas de várzeas existentes no Brasil, passíveis de serem incorporadas ao processo produtivo, necessitando tão somente da sistematização do terreno e da implantação de sistemas de drenagem que não rebaixem muito o lençol freático e assim permita o aproveitamento de fluxo subterrâneo da água por ascensão capilar.

Essas áreas possuem um elevado potencial de produção de hortaliças, dentre as quais, se destaca a cultura da alface (*Lactuca sativa* L.), dado seu importante valor comercial, em qualquer local do mundo, devido seu valor nutricional, estando dentro dos gêneros alimentícios de primeira necessidade.

Dada a complexidade de controle, monitoramento e avaliação das comportamento do lençol freático durante o ciclo da cultura da alface, evidencia-se uma rara existência de pesquisas e estudos que possam indicar as limitações de produção e efeitos da presença ou ausência do lençol freático durante o ciclo produtivo da cultura.

A FAO (1980) não fornece informações sobre a tolerância das culturas ao lençol freático, quando o mesmo satura temporariamente a zona radicular, declarando não dispor de experiência suficiente para tal. Sugere, entretanto, valores de profundidade mínimas permissíveis para lençol em fluxo transiente. Estes valores variam com o tipo de cultura e a textura do solo, na faixa de 0,9 a 1,4 m.

Assim, o contexto desse estudo aborda a capacidade de contribuição hídrica do lençol freático ao desenvolvimento de um cultivo de alface, no sentido de verificar se esta contribuição atende plenamente à demanda de água da cultura.

A pesquisa pressupõe que a taxa de ascensão capilar oriunda do lençol freático no intervalo de profundidade entre 0,10m e 0,30m é capaz de suprir as necessidades hídricas da cultura da alface e tem como objetivo geral obter, utilizando-se duas cultivares de alface, informações que identifiquem as relações de resposta da cultura às taxas de ascensão capilar e aos níveis de profundidade do lençol freático. Especificamente, a pesquisa busca avaliar, a partir

de variáveis de produção, a resposta das cultivares a níveis de profundidade do lençol freático; calcular os valores de SEW_{30} para as profundidades do lençol freático estabelecidas no intervalo de 0,10m a 0,30m e estabelecer relações de produtividade da cultura a estes níveis de estresse SEW, além de calcular as taxas de ascensão capilar oriundas de seis profundidades do lençol freático e proceder à análise com base nas taxas de necessidades hídricas da cultura ao longo do seu ciclo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Movimento e quantificação da água no solo

A água subterrânea em seu estado natural está em contínuo movimento, sendo esse fenômeno governado por leis ou princípios da Hidráulica (CRUCIANI, 1987). Tal movimento, para Brady e Weil (2009), na maioria das vezes ocorre quando o solo se apresenta não saturado sendo este ambiente considerado mais complicado do que o que caracteriza o fluxo saturado de água:

Em solos saturados, praticamente todos os poros são preenchidos com água, embora o movimento da água seja mais rápido nos poros grandes e contínuos. Mas em solos não saturados, estes macroporos estão cheios de ar, deixando apenas os poros mais finos para acomodar o movimento da água. Também, em solos não saturados o conteúdo de água e, por sua vez, a força com que ele é mantido (potencial da água) pode ser altamente variável. Isso influencia a taxa e a direção do movimento e também torna mais difícil a medição do fluxo da água no solo (BRADY e WEIL, 2009; p.174).

Segundo Biassusi (2001), o movimento da água no solo na condição de não saturação, devido a sua importância e complexidade, tem sido um dos mais importantes tópicos pesquisados na física do solo nas últimas décadas. Apesar de avanços teóricos e práticos expressivos, a zona do solo não saturada permanece sendo um desafio para o entendimento científico e manejo tecnológico.

Hillel *et al.* (1976) desenvolveram um modelo macroscópico para estudar a água próxima ao sistema radicular e seu movimento e de solutos no perfil do solo. Para isso, dividiram o sistema radicular em seções, nas quais podem ser definidos os parâmetros do modelo: propriedades hidráulicas do solo e do sistema radicular, o teor de água, concentração de sais na solução do solo, a densidade e a distribuição do sistema radicular e a evapotranspiração com suas flutuações diárias. É um dos poucos modelos que levam em consideração que o componente osmótico do potencial total é função do teor de água. Os autores concluem que o esgotamento da água no solo é uma função de fatores do solo, da planta e do clima, que podem ser descritos sistematicamente e quantitativamente por simulação dinâmica.

Reichardt (1987) trata que no entendimento do movimento da água é necessário o conhecimento das propriedades hidráulicas mais representativas como a condutividade hidráulica e a curva de retenção da água no solo $\Psi_m(\theta)$, onde θ representa a umidade e Ψ_m representa o potencial mátrico da água no solo. Estas propriedades influenciam diretamente na taxa de infiltração da água e solutos na região não saturada do solo.

O fluxo de água na zona não saturada é predominantemente vertical e geralmente pode ser simulado como um fluxo unidimensional (ROMANO *et al.*, 1998). Por esse motivo, Huo *et al.* (2012) afirmam que algumas equações empíricas e modelos numéricos têm sido desenvolvidos e utilizados para quantificar a contribuição do lençol freático às necessidades hídricas das culturas, embasando ainda que todos estes modelos e equações tem mostrados resultados similares.

O acompanhamento do nível de umidade no solo, na zona de maior atividade das raízes, pode ser realizado, indiretamente, por meio de medidas da tensão em que a água se encontra retida no solo. Tais informações podem ser facilmente obtidas por um tensiômetro.

Azevedo e Silva (1999) apontam como sendo as vantagens do uso do tensiômetro: o conhecimento em tempo real da tensão de água no solo e, indiretamente o teor de água deste; utilização do conceito de potencial, medindo diretamente a energia de retenção da água pelo solo; facilidade de uso, desde que convenientemente instalado, mantido e interpretado; e custo relativamente baixo, sendo facilmente encontrado no comércio.

Pavani *et al.* (2008) avaliaram o uso de tensiômetros para o manejo da irrigação na cultura do feijoeiro. Eles mediram o potencial mátrico do solo e estimaram a variação diária do armazenamento de água no solo, na camada de 0 a 0,40 m de profundidade; para isso foram avaliados os componentes de produtividade, além de determinadas a evapotranspiração real média e a eficiência média de uso de água pela cultura.

Segundo Libardi (1995) e Hillel *et al.* (1976), o tensiômetro possibilita, na prática, a medida da tensão da água no solo, também chamado potencial mátrico, na faixa de tensão de 0 - 80 kPa que abrange a maior parte da medida de umidade do solo e em muitos solos agrícolas o tensiômetro alcança porcentagens maiores de que 50% do montante da água disponível para as plantas e em solos de textura grosseira mais de 75%.

Reichardt e Timm (2012) relatam que esse intervalo de potencial limitado, mensurável pelo tensiômetro, não é tão limitado como parece. Ele é uma parte pequena do intervalo total de potenciais, mas, no campo, cobre o principal intervalo de umidade do solo de importância em práticas agrícolas. Ou seja, para a maioria dos solos, maior quantidade de água é retida entre os potenciais de 0 e -0,1 MPa do que entre -0,1 e -1,5 MPa.

O monitoramento da drenagem ou da ascensão capilar da solução no solo é realizado por meio de instrumentos capazes de medir a energia potencial da solução devida às forças de aderência à matriz do solo. Para tanto, o tensiômetro tem se apresentado como um excelente instrumento, por medir essa energia da água no solo diretamente e possibilitar medições *in situ* (FREIRE, 2016). O autor realizou pesquisa para estimativa de parâmetros

hidráulicos do solo utilizando tensiometria com alguns sistemas de leitura e utilizou o tensiômetro com manômetro de mercúrio como padrão.

2.2 Níveis de lençol freático e resposta das culturas

Em seu estudo, Nunes (2014) enfatizou categoricamente que a água é essencial para a produção das culturas, sendo necessário que o melhor uso da água disponível seja realizado para a obtenção de uma produção com altos rendimentos.

O levantamento das condições em que se encontra a água subterrânea, quanto à identificação da posição do nível freático fornecem dados essenciais e necessários para o desenvolvimento de modelos da dinâmica de água no solo (RAMOS, 2009).

Segundo Cruciani (1987), a tolerância das culturas à deficiência de aeração, devido ao excesso de água é muito variável, dependendo da duração do excesso, do estágio de desenvolvimento e do genótipo. Os efeitos do excesso de água causam maior prejuízo quando ocorrem em um período crítico do desenvolvimento da planta (ROJAS, 1984). Assim, por exemplo, no milho, o excesso de água, no primeiro período de crescimento, pode produzir clorose e retardar ou impedir o crescimento.

Costa (1994) avaliando o rendimento do milho e a viabilidade econômica da utilização de sistemas de drenagem, afirma que embora experimentos de laboratório e em campo relacionando profundidade de lençol freático com a produtividade já tenham sido desenvolvidos em outros locais, há uma escassez de estudos para a realidade local.

Um adequado controle do lençol freático seja manejando a irrigação (alta eficiência), ou mediante sistemas artificiais (rede de drenagem) traz como consequência uma série de benefícios para a terra agrícola. Os solos com alta umidade apresentam uma aeração deficiente, a água preenche os poros vazios em que antes havia oxigênio. Esta falta de aeração afeta gradativamente o rendimento das culturas ao reduzir a taxa de oxigênio (MILLAR, 1988).

Para Flecha (2004), as espécies vegetais e algumas vezes as várias cultivares de uma mesma espécie respondem diferentemente à profundidade do lençol freático, conforme o estágio de desenvolvimento. A distribuição das raízes das várias espécies afeta a resposta às condições de aeração do solo. Espécies de sistema radicular raso e fibroso são mais eficientes na absorção de oxigênio, em condições de aeração pobre, do que plantas de sistema radicular profundo. Diferenças genéticas inatas, propiciam respostas diferentes das espécies e cultivares à composição gasosa da atmosfera do solo.

Em se tratando de profundidade de lençol freático, Millar (1988) afirma que a profundidade ideal seria aquela que propiciasse uma condição de fluxo permanente, igualando a taxa de ascensão capilar à evapotranspiração da cultura. Sabe-se que há duas formas de realizar tal avaliação: utilizando-se ou não irrigação. Tal análise, dependerá também das condições edafoclimáticas locais.

Hiler et al. (1971) estudaram os efeitos do lençol freático estático sobre a difusão de oxigênio no solo e sobre a produtividade da cultura do sorgo e concluíram que ocorreu uma redução drástica na produtividade, tanto do ponto de vista quantitativo quanto qualitativo, quando o lençol freático foi mantido a 0,30 e 0,60m, situação ainda mais clara se comparada com os tratamentos a 0,90 e 1,20m.

Para Yang et al. (2007), em particular, os fluxos verticais de água próximo ou no limite do lençol freático precisam ser quantificados porque são significativos para o fornecimento de água para as culturas e até mesmo para os problemas de salinização do solo.

2.3 Resposta das culturas ao fluxo por ascensão capilar

Ahmad *et al.* (2002) afirmam que a água oriunda do lençol freático possui um papel vital na manutenção da produtividade das culturas em muitas das áreas irrigadas no mundo. Sendo que, na maioria dessas regiões, o nível de exploração dos aquíferos tem chegado ao seu potencial máximo ou até mesmo já foram excedidos.

A quantidade de água absorvida pelas raízes a partir de um lençol freático tem se mostrado significativamente relevante e tornou-se um tema de extensa pesquisa (HUO *et al.*, 2012). Kahlowne Azam (2002) e Kahlown *et al.* (2005) investigaram a contribuição do lençol freático às necessidades hídricas de diferentes culturas utilizando 18 lisímetros de grande porte. Eles descobriram que quando o lençol freático foi mantido a uma profundidade de 0,5m, a cultura do trigo foi capaz de atingir o suprimento de toda sua necessidade hídrica, enquanto o girassol atingiu um valor próximo a 80% de toda sua demanda. Em contraste, o milho e o sorgo foram sensíveis a tal situação e suas produtividades foram reduzidas com a aproximação do nível do lençol freático.

Sepaskhah *et al.* (2003) afirmam que um bem sucedido uso do lençol freático através da ascensão capilar depende da capacidade do solo de reter a umidade e das propriedades de transmissão, da demanda de evapotranspiração, da distribuição do sistema radicular da planta e da salinidade e efeitos tóxicos de íons no desenvolvimento da cultura.

Para Huo *et al.* (2012), na prática a frequência e quantidade necessária de irrigação é variável de acordo com as condições da água subterrânea, sendo este fator capaz de afetar diretamente a produtividade das culturas. Os citados autores utilizaram um modelo de simulação do sistema solo-água-plantas-atmosfera para estimar a quantidade de água no solo, assim como as interações e ascensão capilar para diferentes condições de irrigação e de água subterrânea. Tendo sido provado que as culturas utilizaram significantes quantidades de água diretamente do lençol freático, quando os volumes de irrigação foram diminuídos e a profundidade do lençol freático era inferior a 3,0 m, a partir da superfície do solo.

Dardanelli e Collino (2002) estimam que um lençol freático localizado numa profundidade de aproximadamente 6,0 m é capaz de suprir, através de fluxos de ascensão capilar, um valor superior a 23% da demanda hídrica anual da cultura da alfafa.

Em regiões áridas e semiáridas, é importante considerar as contribuições de suprimento hídrico às culturas por ascensão capilar da água oriunda do lençol freático (SEPASKHAH *et al.*, 2003). Em seu trabalho, Grismer e Gates (1988) reportaram que, em condições de aridez, as contribuições do lençol freático por ascensão capilar podem suprir de 60 a 70% das necessidades hídricas das culturas.

Mais recentemente, Soppe e Ayars (2003) mantiveram o nível do lençol freático a uma profundidade de 1,5m e utilizando-se de lisímetros de pesagem foram capazes de determinar que a ascensão capilar contribuiu com valores superiores a 40% do consumo diário de água de um cultivo agrícola e 25% de toda a necessidade hídrica em todo um ciclo.

Destacada a capacidade de suporte às culturas através do fluxo de ascensão capilar oriundo do lençol freático, faz-se necessário destacar a possibilidade de realizar tal suporte artificialmente. Kerbauy (2004) destaca que a irrigação através do controle de nível do lençol freático pode superar a falta de água às plantas e às implicações do déficit hídrico. É um método importante, pois garante uma maior produtividade e reduz a magnitude do estresse. Solos com excesso de umidade implicam em redução da taxa de oxigênio uma vez que apresentam aeração deficiente, pois a água ocupa os poros do solo, fazendo com que os rendimentos das culturas se reduzam.

Rava *et al.* (2002) analisaram a viabilidade de produção de sementes de feijoeiro em várzeas tropicais em Tocantins. Os resultados mostraram que a sub irrigação foi capaz de dar suporte total a produção, alcançando valores de produtividade satisfatórios.

Para Ferrarezi *et al.* (2012) a irrigação via ascensão capilar, além de ser um método capaz de minimizar as perdas de água, também se destaca por minimizar os impactos negativos

ao meio ambiente, capaz de proporcionar o reuso da solução nutritiva oriunda da drenagem, tornando os cultivos agrícolas ambiental e economicamente sustentáveis.

Avaliando a capacidade de suporte da sub irrigação à cultura do milho na região sul do Brasil, Melo *et al.* (2012) utilizaram modelos para representar a relação entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo. Os resultados mostraram que a irrigação suplementar proporcionada pela subirrigação atinge 70% da demanda total no cenário mais favorável e 12% no menos favorável.

2.4 A cultura da alface

A alface (*Lactuca sativa L.*) é originária de espécies silvestres, que ainda hoje são encontradas em regiões de clima temperado do mediterrâneo (Sul da Europa e Ásia Ocidental) (LEMOS NETO, 2015).

A alface é uma cultura exigente em água, tornando importante o manejo adequado da irrigação, o que garante que as necessidades hídricas da cultura sejam supridas e reduz possíveis problemas com doenças e lixiviação de nutrientes, contribuindo ainda com a redução de gastos com água e energia (KOETZ *et al.*, 2006).

Gomes e Sousa (2002) afirmam que devido a tal exigência de água, se torna recomendável a utilização de irrigação por gotejamento, devido a facilidade em controlar o teor de água no solo, mantendo-o próximo à capacidade de campo. A irrigação por gotejamento, quando manejada adequadamente, permite uma maior eficiência de aplicação de água, em consequência de um melhor controle da lâmina de irrigação aplicada, menores perdas por evaporação, por percolação e por escoamento superficial.

Os processos fisiológicos envolvidos na produção vegetal têm uma relação muito estreita com a maior ou menor disponibilidade de água no solo (AGUIAR, 2005). Segundo Flecha (2004), a produtividade relativa da cultura da alface apresenta correlações lineares negativas com o estresse devido ao excesso de água no solo. O efeito do excesso de água na cultura pode ser identificado pela redução da altura da planta, do diâmetro e do peso da parte aérea, além da redução do diâmetro do caule, sendo a variável peso da parte aérea a que apresentou maior sensibilidade.

2.5 Índices de estresse por excesso de água no solo

A complexidade das relações envolvendo a produtividade das culturas e o conteúdo de água no solo não é bem entendida, constituindo-se uma limitação para critérios adequados de drenagem (BOUWER, 1974).

Recentemente, os efeitos do excesso de água no solo sobre o desenvolvimento das plantas têm recebido redobrada atenção. Por essa razão, os pesquisadores vêm desenvolvendo métodos para analisar os efeitos dos sistemas de drenagem sob condições de excesso de água e para prever seus efeitos sobre as produtividades das culturas.

O conceito de SEW_{30} (somatório do excesso de água) foi descrito por Wesseling (1974), e representa a soma do valor excedente de água no solo, conhecido, como a "soma do excesso de água", para quantificar o efeito, sobre a produtividade, da ocorrência do lençol freático na zona radicular da cultura. Se expressa da seguinte forma:

$$SEW_{30} = \sum_{i=1}^n (30 - X_i) \quad (1)$$

Sendo x_i - profundidade do lençol freático abaixo da superfície do solo no dia i , em cm; n - número de dias na estação de crescimento.

Assunção do modelo: estabelece o critério de que números negativos dentro da somatória serão negligenciados, ou seja; só serão computados valores de x_i menores que 30.

Limitação do modelo: O método admite que um lençol freático mantido a 0,05m de profundidade por um dia ($SEW_{30} = 25$ cm dia) tem o mesmo efeito de um lençol freático mantido a 0,25m de profundidade durante cinco dias ($SEW_{30} = 25$ cm dia) (VASCONCELOS, 2003; FLECHA, 2004).

Em razão da flutuação contínua do lençol freático, o SEW_{30} pode ser mais precisamente expresso como:

$$SEW_{30} = \int_0^T f(x) dt \quad (2)$$

Sendo $f(x) = 30 - x$; para $x < 30$; $f(x) = 0$; para $x > 30$; T - comprimento da estação de crescimento; t - tempo em dias; x - profundidade do lençol freático em cm.

Em três anos de estudo sobre a resposta do milho às condições naturais de flutuação do lençol freático, Kanwar *et al.* (1988) investigaram a influência das condições de excesso de

água no solo sobre a produtividade do milho em cinco diferentes estádios fenológicos. Eles verificaram que a produtividade foi reduzida significativamente quando o valor de SEW_{30} para o 1º estágio de desenvolvimento excedeu 40 cm dia. Os autores observaram também, que a produtividade do milho decresceu linearmente, com o incremento dos valores de SEW_{30} .

Além de fornecer uma indicação sobre o tempo de permanência do lençol freático em profundidade menor que 0,30m, o índice de estresse por excesso de água permite também a avaliação da qualidade da drenagem (OBREZA *et al.*, 1993). Entretanto, existem limitações quanto ao uso do SEW_{30} em que valores iguais de SEW obtidos a partir de diferentes níveis de drenagem podem produzir níveis de estresse iguais na cultura.

O conceito de SDI (índice de estresse diário) foi introduzido por Hiler (1969), como um recurso para quantificar, cumulativamente, o efeito de estresse imposto sobre uma cultura durante a estação de crescimento. O SDI é determinado por um fator de estresse diário (SD) e um fator de suscetibilidade da cultura (CS). O SD, sendo uma medida do grau de estresse imposto sobre uma cultura, reflete a intensidade e a duração do estresse. O CS, sendo uma medida da suscetibilidade da cultura para uma unidade de estresse, é função da cultura e de seu estágio de desenvolvimento.

Conceitualmente o SDI pode ser escrito como:

$$SDI = \sum_{i=1}^n (SD_i \cdot CS_i) \quad (3)$$

Sendo n - número de períodos de crescimento; SD - fator de estresse diário da cultura no período i; CS - fator de suscetibilidade da cultura no período i.

O índice de estresse de excesso de água no solo SEW_{30} é normalmente utilizado como fator de estresse diário da cultura, em estudos que envolvem o índice de estresse diário.

O fator de suscetibilidade da cultura é determinado experimentalmente, tomando-se por base o nível crítico de estresse ao qual a cultura foi submetida, durante cada estágio de desenvolvimento fisiológico, bem como a quantificação de sua resposta à produtividade.

O fator de suscetibilidade para cada estágio de desenvolvimento da cultura é definido por Hiler (1969) e expresso como:

$$CS_i = \frac{Y - Y_s}{Y} \quad (4)$$

Sendo Y - produtividade da cultura na ausência de estresse; Y_s - produtividade da cultura sujeita ao estresse crítico no estágio de crescimento i .

A importância do fator CS no conceito de SDI é definir a suscetibilidade da cultura, em algum estágio de crescimento, a uma unidade de estresse. Não é o valor absoluto do fator CS que importa, mas preferivelmente valores relativos para vários estágios de crescimento. Quando $Y_s \rightarrow 0 \therefore CS \rightarrow 1,0$ (Alta sensibilidade ao nível de estresse); Quando $Y_s \rightarrow Y \therefore CS \rightarrow 0,0$ (Pouca sensibilidade ou alta resistência ao nível de estresse).

De acordo com Hiler e Clark (1971), o fator de suscetibilidade da cultura é uma função das espécies, estágio fenológico da cultura e indica a sua suscetibilidade para dada magnitude de SD.

Carter et al. (1990) pesquisaram a produtividade do milho-doce em várias durações de excesso de água no solo durante dois estágios: vegetativo e florescimento. Eles determinaram fatores de suscetibilidade da cultura baseados no peso do milho comercializável, da ordem de 0,55 e 0,45, respectivamente. Tais fatores indicam que o milho doce é altamente suscetível ao estresse de excesso de água no solo, durante ambos os estágios de crescimento e, usualmente mais, durante o estágio vegetativo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização do modelo físico do experimento

O experimento foi conduzido no segundo semestre do ano de 2015 utilizando-se um modelo físico constituído por oito lisímetros de drenagem na área externa do Laboratório de Hidráulica e Irrigação, Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, em Fortaleza, CE, a 3°45' de latitude Sul, 38°33' de longitude oeste e altitude de 19,53m. Ao lado da área do experimento está localizada uma estação agrometeorológica convencional onde foram obtidos os dados climáticos utilizados no manejo da irrigação do experimento.

O clima da região, de acordo com a classificação de Köeppen, é do tipo AW', tropical chuvoso, com precipitação média anual de 1350 mm concentrada nos meses de janeiro a abril, temperatura média anual de 26,5°C e umidade relativa do ar média anual de 80% de acordo com os dados coletados na Estação Agrometeorológica do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará.

O modelo físico dos lisímetros de drenagem é composto por oito lisímetros de alvenaria que medem 1,5 m de altura, 2,0 m de largura e 1,5 m de comprimento, sendo estes lisímetros revestidos de argamassa e internamente impermeabilizados (Figura 1).

Figura 1 - Vista lateral (A) e superior (B) dos lisímetros de drenagem utilizados na pesquisa.



Fonte: o próprio autor

Na parte interna de cada lisímetro, existe um dreno tubular corrugado e flexível de PVC (DN 65) na profundidade de 1,10 m em relação à parte superior do lisímetro. Duas entradas de água foram colocadas junto ao fundo da parede frontal, ambas ligadas a um registro, que permite o enchimento individual dos lisímetros.

O modelo físico possibilita uma saturação do solo por fluxo ascendente, através de um reservatório existente ao lado do mesmo. Um sistema de registro e boia regula a altura máxima da água no reservatório de onde a mesma chega aos lisímetros de drenagem até um nível máximo de 0,15 m da borda superior.

Além do sistema de alimentação e de drenagem, os lisímetros possuem para fins de monitoramento da profundidade do lençol freático, na parede frontal da parte externa de cada lisímetro, um piezômetro constituído por uma mangueira plástica transparente (Figura 2), acoplada à entrada de água próximo ao registro, que permite verificar e controlar o nível do lençol freático. O piezômetro se prolonga até a altura em que se deseja manter o lençol freático, sendo possível este monitoramento pelo princípio de vasos comunicantes.

Figura 2 - Detalhe dos piezômetros existentes na parede frontal externa em cada lisímetro.



Fonte: o próprio autor.

3.2 Instalação e condução do experimento

O solo utilizado no experimento foi predominantemente arenoso (Tabela 1), coletado no município de São Luís do Curú - CE (84 km da cidade de Fortaleza - CE) e analisado no Laboratório de Física do Solo do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal do Ceará (UFC). Na Tabela 2 são apresentados alguns atributos físicos do material de solo que nos permite estimar com base na equação de van Beers, a porosidade drenável ou efetiva em 32,9%, conforme Duarte *et al.* (2015).

Tabela 1– Granulometria e classe textural do solo utilizado nos lisímetros de drenagem.

Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classificação textural
95	4	1	Arenoso

Fonte: Nascimento Filho (2013).

Tabela 2– Atributos físicos da areia utilizada na composição do substrato colocado nos lisímetros de drenagem (Fortaleza, CE, 2013).

Atributos físicos do solo arenoso – São Luís do Curú / CE	
Condutividade hidráulica do solo saturado	450 mm h ⁻¹
Porosidade total	45 %
Porosidade drenável (efetiva)	32,9%
Densidade do solo	1480 kgm ⁻³
Argila dispersa em água	0,7 %

Fonte: Nascimento Filho (2013).

Para formação do substrato realizou-se uma incorporação, cerca de 30 dias antes do transplântio das mudas, de um composto orgânico comercial, distribuído uniformemente pelos lisímetros na razão de 13 kg m⁻² (Figura 3).

Figura 3 - Incorporação do composto orgânico para formação do substrato.



Fonte: o próprio autor.

A cultura selecionada para o desenvolvimento do experimento foi alface do tipo americana, utilizando-se as cultivares Lucy Brow (C1) e Gloriosa (C2), sendo utilizado um espaçamento de 0,20 m x 0,20 m, conforme Lemos Neto (2015).

A semeadura foi realizada no dia 04/08/2015 nas dependências da Horta Didática (HD) do Departamento de Fitotecnia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará. Foram utilizadas sementes peletizadas, por garantirem uma elevada taxa germinação, tendo sido semeadas quatro bandejas de duzentas células (duas bandejas para cada cultivar), utilizando-se como substrato um composto orgânico à base de húmus de minhoca e restos vegetais. As sementes germinaram dois dias após a semeadura (DAS) e aos sete DAS já se constatava as mudas efetivamente estabelecidas (Figura 4).

Figura 4 - Germinação dois DAS com elevado percentual de germinação sete DAS.



Fonte: o próprio autor.

O transplântio de ambas as cultivares foi realizado aos 26 DAS, seguindo a disposição do delineamento experimental, tendo sido realizado no final da tarde, para minimizar os efeitos da mudança das mudas das bandejas para o campo.

Nos primeiros dez dias após o transplântio (DAT), a demanda hídrica da cultura foi suprida com a aplicação de uma lâmina de irrigação equivalente à necessidade hídrica da cultura.

A evapotranspiração potencial da cultura (ET_{pc}) foi estimada pela seguinte expressão:

$$ET_{pc} = ET_o \times K_c \quad (5)$$

Sendo ET_{pc}: Evapotranspiração potencial da cultura, em mmdia⁻¹; ET_o: Evapotranspiração de referência, em mmdia⁻¹; K_c: coeficiente de cultivo para cada fase de desenvolvimento da cultura.

A evapotranspiração de referência (ET_o) foi estimada pelo método de Penman-Monteith (FAO), utilizando-se o software Cropwat for Windows Versão 4.2. Os dados climáticos necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência foram obtidos na estação agrometeorológica localizada ao lado da área experimental.

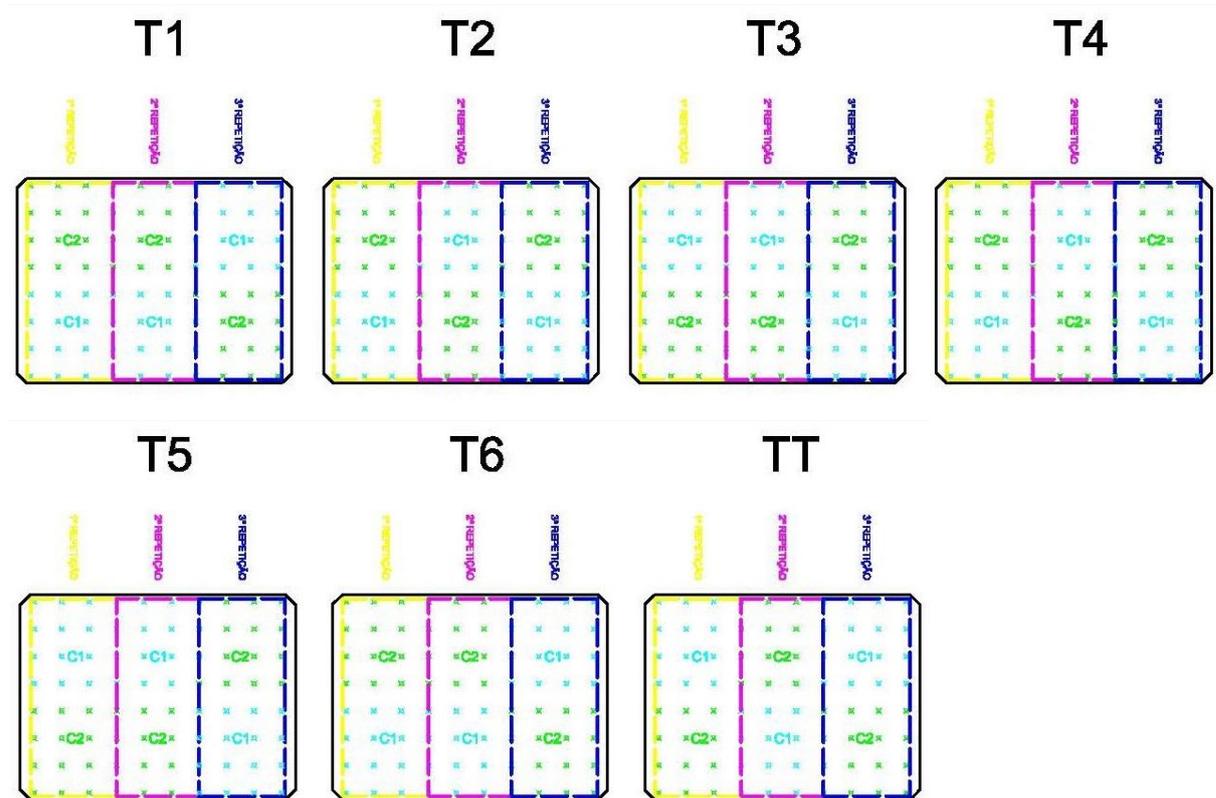
Diversos autores (NUNES, 2014; LEMOS NETO, 2015; RESENDE et al., 2007; FLECHA, 2004; GOMES & SOUSA, 2002) citam que o K_c da alface apresentam valores, em seu estado de desenvolvimento máximo, variando entre 0,9 e 1,0 dependendo da espécie e cultivar utilizada, sendo utilizado um valor médio de 0,95 para o cálculo da ET_M.

3.3 Delineamento experimental

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, no arranjo fatorial (7 x 2) com três repetições. Os tratamentos foram obtidos mediante a associação de seis níveis de manutenção da profundidade do lençol freático (T1 = 0,10 m; T2 = 0,15 m; T3 = 0,20 m; T4 = 0,25 m; T5 = 0,30 m e T6 = 0,35 m), acrescido de um tratamento com ausência de lençol freático (controle), cuja irrigação diária atendia à necessidade hídrica da cultura, além de duas cultivares de alface, conforme croqui apresentado na Figura 5.

Considerando como bordadura as fileiras de plantas vizinhas às bordas dos lisímetros e as linhas entre as repetições, ao todo, em cada tratamento, foi possível obter dezoito plantas úteis para cada cultivar nas três repetições.

Figura 5 - Croqui do delineamento experimental.



Fonte: o próprio autor.

3.4 Estimativa da densidade de fluxo oriunda da ascensão capilar

A estimativa da densidade de fluxo oriunda da ascensão capilar foi calculada através da equação de Darcy - Buckingham, conforme Libardi (2012), sendo:

$$q = -K(\theta) \frac{\partial \psi_t}{\partial Z} \quad (6)$$

Sendo $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado [LT^{-1}] como função da umidade do solo θ [$L^3 L^{-3}$]; $\frac{\partial \psi_t}{\partial Z}$: gradiente de potencial total da água no solo [LL^{-1}].

3.4.1 Condutividade hidráulica do solo não saturado - $K(\theta)$

A condutividade hidráulica do solo não saturado foi estimada com base no método do perfil instantâneo. Conforme Libardi (2012), o método se aplica onde o lençol freático está ausente ou bem profundo, de tal maneira a não afetar o fluxo de água e onde o perfil de solo

pode ser heterogêneo. Na aplicação do método escolheu-se um dos lisímetros de drenagem, com o propósito de que os processos em seu centro não fossem afetados pelos seus limites.

Inicialmente, o solo contido no lisímetro de drenagem foi umedecido até a saturação, e em seguida cobriu-se a parcela com lona plástica com o objetivo de se evitar fluxo de água pela superfície, seja por evaporação ou por infiltração, conforme as condições de contorno do método do perfil instantâneo.

A equação a seguir mostra a relação exponencial obtida para o limite inferior do volume de solo ($Z = 0,20\text{m}$) utilizada no cálculo do fluxo por ascensão capilar.

$$K(\theta) = 10800 \cdot e^{200(\theta-0,39)} \quad (7)$$

Sendo $K(\theta)$: condutividade hidráulica do solo não saturado, em mm dia^{-1} ; θ : umidade volumétrica, em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$.

Tendo em vista que a expressão matemática da função $K(\theta)$ tem como uma das variáveis a condutividade hidráulica do solo saturado (K_o), utilizou-se o método do permeâmetro de carga constante como metodologia para obtenção desta variável.

Durante a realização do teste com o permeâmetro de carga constante utilizou-se um frasco de Mariotte para manter a carga hidráulica constante (Figura 6) e amostras de solo com estrutura não deformada. O valor de K_o foi obtido através da seguinte equação:

$$K_o = \frac{V_A \cdot L}{A \cdot t(h + L)} \quad (8)$$

Sendo V_A : volume de água percolada durante o tempo t ; A : área da secção transversal da amostra; L : comprimento da amostra; h : potencial de pressão (= carga hidráulica) no topo da amostra.

Figura 6 - Permeâmetro de carga constante com frasco de Mariotte.



Fonte: o próprio autor.

3.4.2. Gradiente de potencial total

O potencial total de água no solo foi utilizado para descrever o fluxo da água entre dois pontos situados às profundidades de 0,10m e 0,30m caracterizando, assim, o movimento da água naquela região, tendo sido determinado a partir da seguinte equação:

$$\Psi_T = \Psi_m + \Psi_g. \quad (9)$$

Sendo Ψ_m o potencial mátrico e Ψ_g o potencial gravitacional. O cálculo do gradiente de potencial total da água no solo na profundidade estudada foi realizado através da expressão a seguir, que representa a diferença de potenciais totais em duas profundidades consecutivas pela distância entre elas.

$$\left[\frac{\partial \Psi_T}{\partial Z} \right] \approx \left[\frac{\Delta \Psi_T}{\Delta Z} \right] = \left[\frac{\Psi_T^{(c)} - \Psi_T^{(b)}}{\Delta Z} \right]. \quad (10)$$

Sendo $\left[\frac{\partial \psi_T}{\partial Z} \right]$: gradiente de potencial total da água no solo, na profundidade desejada; $\psi_T^{(c)}$: potencial total da água no solo à profundidade de 0,10m e $\psi_T^{(b)}$: potencial total da água no solo à profundidade de 0,30m; ΔZ : distância vertical entre os tensiômetros.

3.5 Curva de retenção de água no solo

Devido à homogeneidade do solo nos lisímetros, para fins de determinação da curva de retenção de água no solo, coletaram-se duas amostras de solo não deformadas em duas faixas de profundidades distintas (0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m) em apenas um dos lisímetros.

No laboratório, as amostras foram saturadas, por pelo menos 72 horas, para avaliação de seu conteúdo volumétrico na saturação. Em seguida, as amostras foram submetidas às tensões de 2, 4, 6, 8, 10,33, 100 e 1500 kPa.

Para os pontos de baixas tensões, o conteúdo de água foi determinado mediante o uso do funil de Haines; os demais pontos em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). No ajuste da curva utilizou-se um modelo estatístico de regressão não linear e o software SWRC 3.0 (DOURADO NETO et al., 2001), conforme Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha |\Psi_m|)^n \right]^m} \quad (11)$$

Sendo θ : umidade a base de volume, m^3m^{-3} ; θ_r : umidade residual, m^3m^{-3} ; θ_s : umidade de saturação, m^3m^{-3} ; Ψ_m : potencial de água no solo, cmH_2O , e α , m e n : parâmetros empíricos do modelo estatístico.

3.6 Monitoramento das tensões de água no solo

Para o acompanhamento diário dos potenciais mátricos e, por conseguinte, do teor de água no solo, em cada tratamento foi utilizada uma bateria de tensiômetros de mercúrio, instalados em três diferentes profundidades: 0,10, 0,20 e 0,30m.

O tensiômetro de mercúrio permitiu a determinação do potencial mátrico do solo a partir da seguinte equação:

$$\Psi_m = -12,6 h + h_1 + Z. \quad (12)$$

Em que, h é a leitura em cm da coluna de mercúrio, h_1 é a altura do nível de mercúrio na cuba em relação a superfície do solo e Z é a profundidade de instalação da cápsula porosa do tensiômetro.

Os dados de potencial mátrico permitiram que se calculasse o teor de água no solo, a partir da equação ajustada de van Genuchten, que representa a relação funcional entre umidade e potencial mátrico.

3.7 Soma do excesso de água associado aos níveis do lençol freático

Os dados de profundidade do lençol freático permitiram quantificar, para cada tratamento, o índice de estresse SEW, que representa a soma do valor excedente de água no solo, conhecido como a "soma do excesso de água", para avaliar o efeito, sobre a produtividade, da ocorrência do lençol freático na zona radicular da cultura. Tendo em vista a profundidade do sistema radicular adotou-se na presente pesquisa, o índice de estresse SEW_{30} (BOUWER, 1974; FLECHA, 2004). No cálculo, utilizou-se a seguinte equação:

$$SEW_{30} = \sum_{i=1}^n (30 - x_i) \quad (13)$$

Sendo x_i - profundidade do lençol freático abaixo da superfície do solo no dia i , em cm; n - número de dias na estação de crescimento.

O método estabelece o critério de que números negativos dentro da somatória sejam negligenciados, ou seja; só serão computados valores de x_i menores que 30. Os valores da soma de excesso de água (SEW_{30}) foram determinados para os tratamentos correspondentes aos níveis do lençol freático entre 0,10m e 0,30m e um período de 30 dias. Desta forma, os valores de SEW_{30} correspondentes aos tratamentos com níveis do lençol freático entre 0,10 e 0,30m são de 600 cm dia, 450 cm dia, 300 cm dia, 150 cm dia e 0 cm dia.

Estabeleceu-se um histograma dos dados de produtividade com os valores de SEW_{30} , com o propósito de se analisar as regiões com excesso e déficit de água à cultura.

3.8 Variáveis de produção da cultura da alface

As variáveis analisadas em função dos níveis de profundidade do lençol freático foram fotossíntese, transpiração e produtividade da cultura da alface.

Nas medições de taxas de fotossíntese e transpiração utilizou-se um medidor de trocas gasosas, IRGA (LICOR 6400XT, Licor, USA), conforme se visualiza na Figura 7. As medições eram realizadas sempre entre às 09 e às 11h da manhã utilizando fonte de luz artificial de radiação de $1400 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Foram realizadas leituras de fotossíntese e de transpiração para todos os níveis do lençol freático, além do tratamento sem a presença do lençol freático, considerado como testemunha.

Na determinação da produtividade da cultura, cada amostra colhida teve o sistema radicular removido, sendo a massa folhosa obtida em balança de precisão (massa fresca). Os dados de massa fresca e área ocupada pela amostra permitiram a obtenção dos dados de produtividade.

Figura 7 - Medição da taxa fotossintética com o IRGA (LICOR 6400XT, Licor, USA)



Fonte: o próprio autor.

3.9 Análises estatísticas

A análise de variância visa, fundamentalmente, verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente, sendo possível avaliar afirmações sobre as médias de populações. Para realização da análise, os dados foram tabulados e organizados de acordo com cada cultivar, tratamento e repetição dispostos no delineamento inteiramente casualizado.

Utilizou-se o programa computacional SAEG (Sistema de Análises Estatísticas), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa, MG, versão 9.1 (2007) para determinar a variância dos dados em um nível de significância de 5% e o teste de Tukey para comparação das médias. Analisaram-se os parâmetros de interação cultivar, nível de lençol freático e cultivar x nível de lençol freático. Ajustaram-se ainda aos dados os seguintes modelos estatísticos de regressão:

Linear: $Y = a + b \cdot X$

Quadrático: $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2$

Cúbico: $Y = a + b \cdot X + c \cdot X^2 + d \cdot X^3$

Raiz Quadrada: $Y = a + b \cdot X^{\frac{1}{2}} + c \cdot X$

Potencial: $Y = a \cdot X^b$

Exponencial: $Y = a \cdot b^x$

Hiperbólico 1: $Y = a + \frac{b}{X}$

Hiperbólico 2: $Y = \frac{1}{a + b \cdot X}$

Logarítmico: $Y = a + b \cdot \ln(X)$

Logarítmico: $Y = a + b \cdot \log(X)$

Log-recíproco: $\log(Y) = a \cdot \frac{b}{X}$

Cúbico-raiz: $Y = a + b \cdot X^{\frac{1}{2}} + c \cdot X + d \cdot X^{1,5}$

Ln-ln: $\ln(Y) = a + b \cdot \ln(X)$

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resposta das cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático e do índice de estresse por excesso de água no solo, SEW₃₀

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise de variância das variáveis-resposta produtividade, condutância estomática, eficiência do uso da água, fotossíntese e transpiração da cultura para as duas cultivares, os quais demonstraram que o fator cultivar se mostrou significativo em nível de 5% para as variáveis produtividade, eficiência do uso de água e fotossíntese, tendo as demais variáveis analisadas um resultado não significativo.

Tabela 3– Análise de variância das variáveis-resposta produtividade, condutância estomática, eficiência do uso da água, fotossíntese e transpiração.

Variável	Parâmetro	G. L.	Teste F.	Prob. > F.
Produtividade	Nível LF	6	342,66	0,0000
	Cultivar	1	17,67	0,0002
	Nível LF X Cultivar	6	7,53	0,0000
Condutância Estomática	Nível LF	6	3,37	0,0125
	Cultivar	1	0,01	*****
	Nível LF X Cultivar	6	1,67	0,1659
Eficiência do uso da água	Nível LF	6	3,90	0,0099
	Cultivar	1	5,90	0,0230
	Nível LF X Cultivar	6	1,10	0,3879
Fotossíntese	Nível LF	6	3,61	0,0088
	Cultivar	1	13,80	0,0009
	Nível LF X Cultivar	6	1,23	0,3212
Transpiração	Nível LF	6	14,72	0,0000
	Cultivar	1	0,00	*****
	Nível LF X Cultivar	6	0,42	*****

Fonte: o próprio autor.

Não obstante, o fator nível do lençol freático se mostrou como um fator altamente significativo, considerando que a probabilidade de se rejeitar a hipótese de nulidade (Prob.> F) foi inferior a 0,1%. O fator de produção água como fonte de suprimento à demanda hídrica da cultura, a qual varia temporalmente, ao se mostrar significativo em nível de 5%

demonstra claramente uma diferenciação no suprimento hídrico decorrente das diversas profundidades estabelecidas.

Os resultados da análise de variância mostraram o item cultivar como tendo sido um fator significativo, além disso, verifica-se com base aos resultados de produtividade, que a cultivar Gloriosa apresentou uma tendência de maior produtividade associada ao fator níveis do lençol freático. Tal diferença entre os resultados das cultivares é comum a diversos estudos como os de Suinaga et al. (2013) e Blat et al. (2011) que utilizaram diversas cultivares de alface para analisar suas repostas a aplicação de lâminas de irrigação.

Após a ANOVA, realizou-se a aplicação dos modelos de regressão descritos anteriormente. Como pode ser observado a seguir, apenas os obtidos através das variáveis produtividade (cultivar 1 e 2) e eficiência do uso da água (cultivar 1) obtiveram modelos capaz de representar o seu comportamento.

Tabela 4– Aplicação dos modelos de regressão do programa SAEG a diferentes variáveis de produção para duas cultivares de alface.

Variável	Cultivar	Modelos de Regressão												
		01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13
Produtividade	C1					X	X		X					X
	C2						X		X					
Condutância	C1													
Estomática	C2													
Eficiência do uso da água	C1		X		X			X				X		
	C2													
Fotossíntese	C1													
	C2													
Transpiração	C1													
	C2													

Fonte: o próprio autor.

Os valores médios de produtividade, condutância estomática, eficiência do uso da água, fotossíntese e transpiração das cultivares de alface em função dos tratamentos níveis do lençol freático são apresentados no Apêndice A.

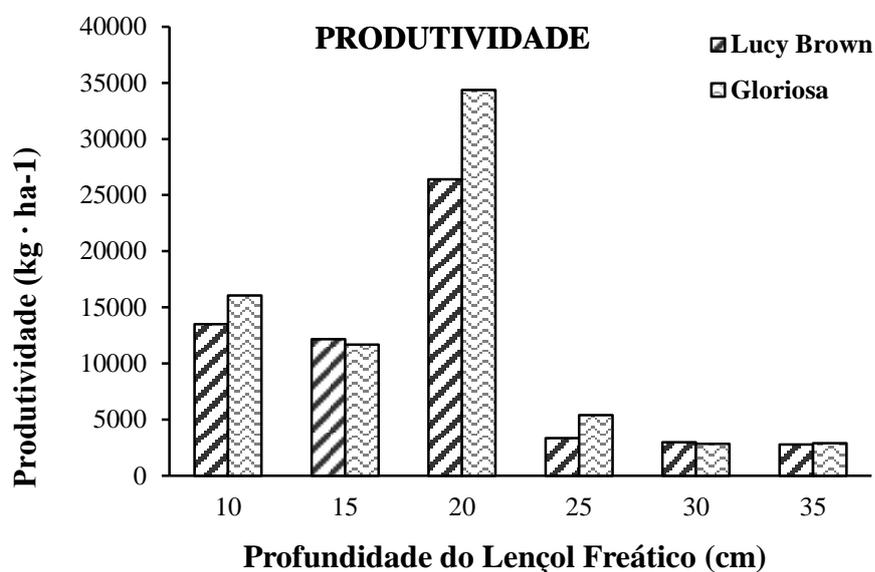
Na condição de ausência do lençol freático, cujo tratamento era associado à irrigação para atender à evapotranspiração potencial da cultura, os níveis de produtividade

obtidos para as duas cultivares foram semelhantes, porém inferiores aos níveis de produtividades para lençol freático variando de 0,10 a 0,20 m, o que pode ser explicado em razão do status energético de água no solo nestas profundidades ter propiciado condições de ausência de estresse por déficit de água ao longo do ciclo da cultura, o que sempre ocorre durante o intervalo das irrigações.

As máximas produtividades físicas médias foram obtidas em ambas as cultivares para o nível do lençol freático a 0,20m de profundidade, que corresponde ao limite onde na maioria das vezes se localiza a profundidade efetiva do sistema radicular da alface (FILGUEIRA, 2013; RESENDE et al., 2007).

O comportamento das produtividades das cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático (Figura 8) guarda entre si uma semelhança, seja pelo nível do lençol freático (0,20m) associado à produtividade máxima, seja pela tendência de queda da produtividade para nível do lençol freático ligeiramente superior ou inferior a 0,20m. Estes resultados sugerem que a profundidade do lençol freático a 0,20m permitiu uma condição mais favorável de suprimento de água à cultura, comparativamente aos demais tratamentos.

Figura 8 - Produtividade das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático.



Fonte: o próprio autor.

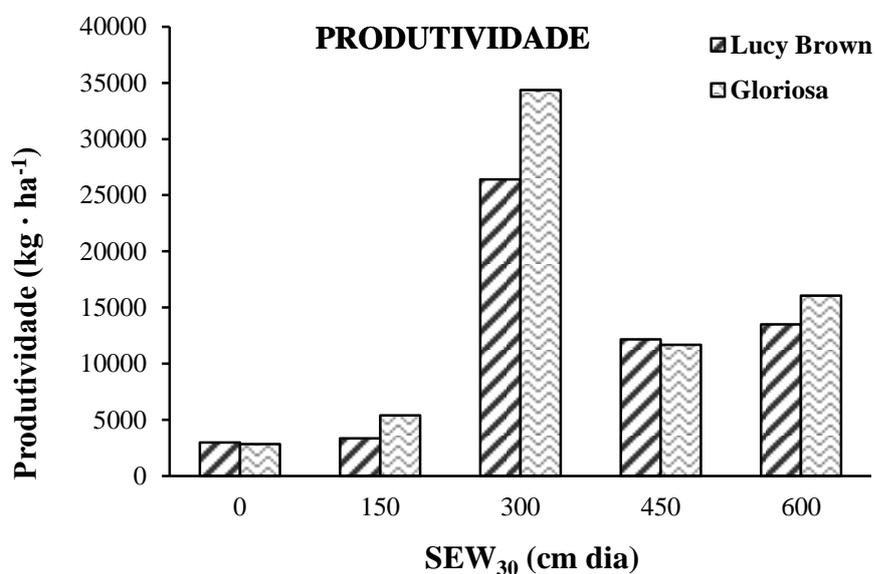
De acordo com Bengtson *et al.* (1984), a produtividade da maioria das culturas começa a decrescer quando os valores de SEW_{30} situam-se entre 100 e 200 cm dia. A grande sensibilidade ao encharcamento revelado para a cultura da alface, mesmo para as condições em

que o lençol freático é rapidamente rebaixado leva a supor que, quando possível, deve-se evitar que o lençol freático atinja a superfície do solo após uma recarga intensa. Nesse sentido, o plantio sobre canteiros, leiras ou camalhões, pode se apresentar como uma boa opção prática (FLECHA, 2004).

Não obstante, na presente pesquisa, o efeito do estresse por déficit de água se mostrou mais limitante ao rendimento da cultura, conforme se visualiza na Figura 8, cujos dados de produtividade para níveis de lençóis freáticos mais profundos que 0,20 m chegam a ser inferiores aos níveis de lençóis freáticos menores que 0,20 m. Nesta análise está se considerando o lençol freático a 0,20m como um plano divisor dos níveis de estresse por excesso e por déficit de água.

A Figura 9 ilustra o comportamento da produtividade em função do fator de estresse SEW_{30} , cujo lençol a 0,20 m de profundidade ($SEW_{30} = 300$ cm dia) permitiu a obtenção de maiores níveis de produtividade para as duas cultivares. Para Pereira et al. (1999), o estresse hídrico ao longo do ciclo da cultura pode alterar seu desenvolvimento, modificando a fisiologia, morfologia e afetando as relações bioquímicas da planta.

Figura 9 - Relação entre a produtividade e o índice de estresse hídrico em duas cultivares de alface.



Fonte: o próprio autor.

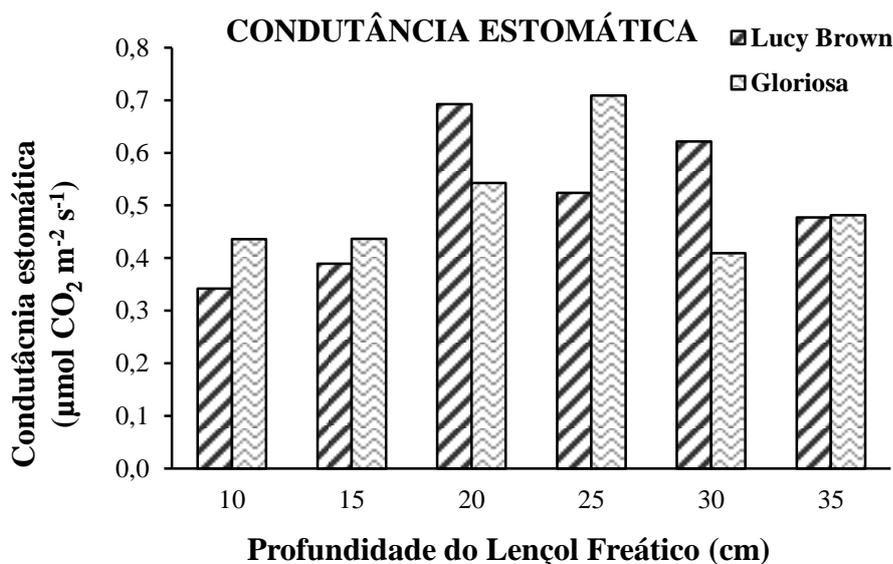
Nunes (2014) observou em cultivo de alface sob condições de irrigação localizada, que o decréscimo inferior a 6% no nível de produtividade média observada da alface ao se reduzir em 50% a lâmina de irrigação aplicada, demonstra que este fator de produção, além de

não ter sido limitante, possibilita o uso da estratégia de irrigação com déficit sem maiores impactos no valor bruto da produção.

Em se tratando de respostas fisiológicas foram observados comportamentos mais divergentes entre as cultivares, nos diferentes tratamentos, do que efetivamente por conta dos estresses de excesso e déficit hídrico, com exceção a condutância estomática (Figura 10).

Tal comportamento pode ser explicado porque os primeiros processos a serem afetados por moderada deficiência/excesso de água são a divisão e a expansão celular, que pode ser retardada ou interrompida. Além disso, o crescimento das folhas e caules diminui bem antes do estresse hídrico tornar-se severo a ponto de causar o fechamento dos estômatos e uma diminuição na fotossíntese.

Figura 10 - Condutância estomática das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático.



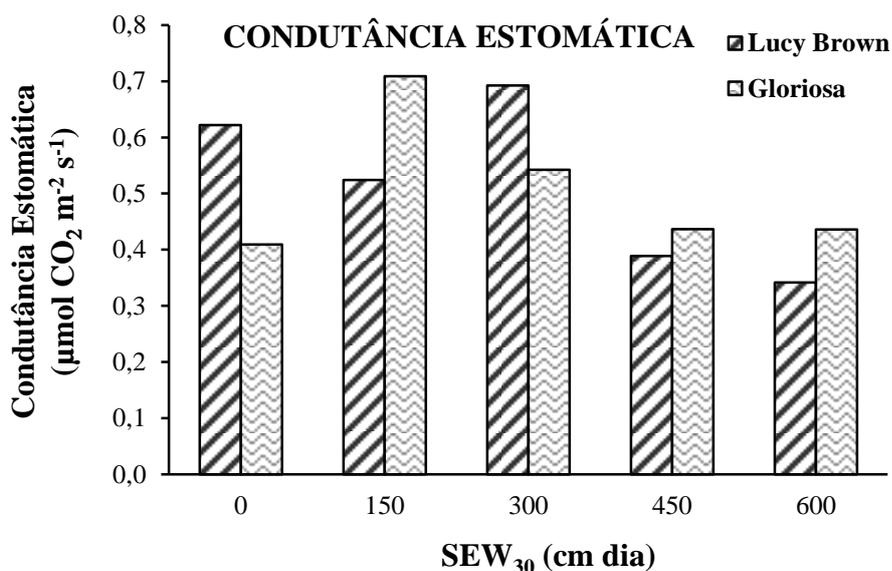
Fonte: o próprio autor.

De acordo com Paiva et al. (2005), o decréscimo de água no solo diminui o potencial de água na folha e sua condutância estomática, promovendo o fechamento dos estômatos, o que bloqueia o fluxo de CO₂ para as folhas, afetando o acúmulo de fotoassimilados. Por outro lado, a planta responde positivamente às condições mais favoráveis de água no solo, mantendo taxas fotossintéticas elevadas, proporcionando uma maior produção de fotoassimilados, implicando em maiores produções de matéria fresca.

Com a diminuição de conteúdo de água nas folhas da planta, suas células tipicamente contraem-se e as paredes perdem a turgidez. Esse decréscimo de volume celular

resulta em menor pressão de turgor e na subsequente concentração de solutos na célula. Como a redução do turgor é o primeiro efeito significativo do déficit hídrico, as atividades dependentes do turgor, como a expansão foliar e o alongamento de raízes são mais sensíveis (TAIZ & ZEIGER, 2009).

Figura 11 - Relação entre a condutância estomática e o índice de estresse hídrico em duas cultivares de alface.



Fonte: o próprio autor.

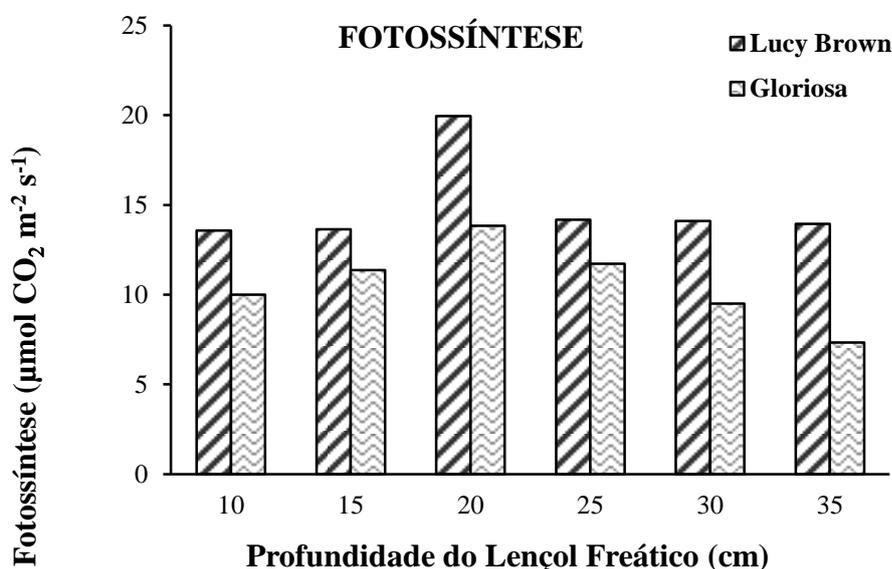
De forma semelhante à relação produtividade da cultura em função dos níveis do lençol freático, a fotossíntese (Figura 12) e a transpiração (Figura 14) apresentam os maiores valores para as ambas as cultivares também no nível do lençol freático correspondente a 0,20m, não obstante, uma redução acentuada, sobretudo na taxa de transpiração, para as condições de maiores níveis de estresse por excesso de água. Jiang e Wang (2006) afirmam que o estresse de excesso hídrico ocasiona redução da síntese de carboidratos e clorofilas ocasionando o comprometimento do desenvolvimento da planta, perda sua cor original e diminuição do crescimento das raízes.

Nos solos encharcados, o oxigênio, componente do ar, não está presente. Dessa maneira, as raízes irão realizar a chamada respiração anaeróbia, que tem por consequência a redução do crescimento radicular e menos absorção de água e nutrientes. De outra forma, o déficit hídrico provoca diminuição da fotossíntese, motivada, principalmente, pelo fato dos estômatos se fecharem e a entrada de CO₂ ser minimizada. Além disso, a murcha das folhas

provoca redução da superfície de absorção de luz, contribuindo para a redução das taxas fotossintéticas.

Demuner et al., (2017), trabalhando com emergência plântulas de tomate sobre diferentes tensões de retenção de água no solo, percebeu que as plântulas respondem positivamente às condições mais favoráveis de água no solo, mantendo taxas fotossintéticas elevadas, proporcionando uma maior produção de fotoassimilados, implicando em maiores produções de matéria fresca.

Figura 12 - Fotossíntese em cultivares de alface em função de níveis do lençol freático.

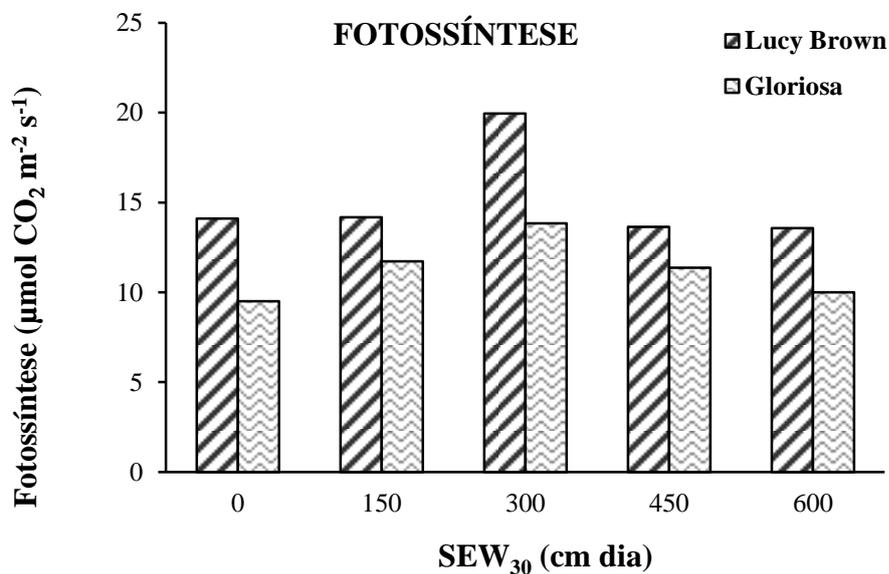


Fonte: o próprio autor.

Nascimento Filho (2013) verificou em experimento com a cultura da grama bermuda que a taxa fotossintética no tratamento com lençol freático a 0,05m da superfície do solo, decresceu em torno de 2/3 do valor para a condição de ausência do lençol freático, o que acarretou coloração não adequada à grama, demonstrando as consequências do nível de aeração inadequado no sistema radicular da cultura.

Como pode ser observada na Figura 13, a fotossíntese reagiu diretamente tanto ao excesso quanto ao déficit hídrico, tendo sido o SEW₃₀ ao nível 300 cm dia, a melhor resposta para ambas as cultivares. Kron et al. (2009) corrobora com esses resultado quando afirma que as plantas quando são expostas a situações estresse hídrico exibem, frequentemente, respostas fisiológicas que resultam de modo indireto, na conservação da água no solo, como se estivessem economizando para períodos futuros.

Figura 13 - Fotossíntese em cultivares de alface em função do índice SEW_{30} .

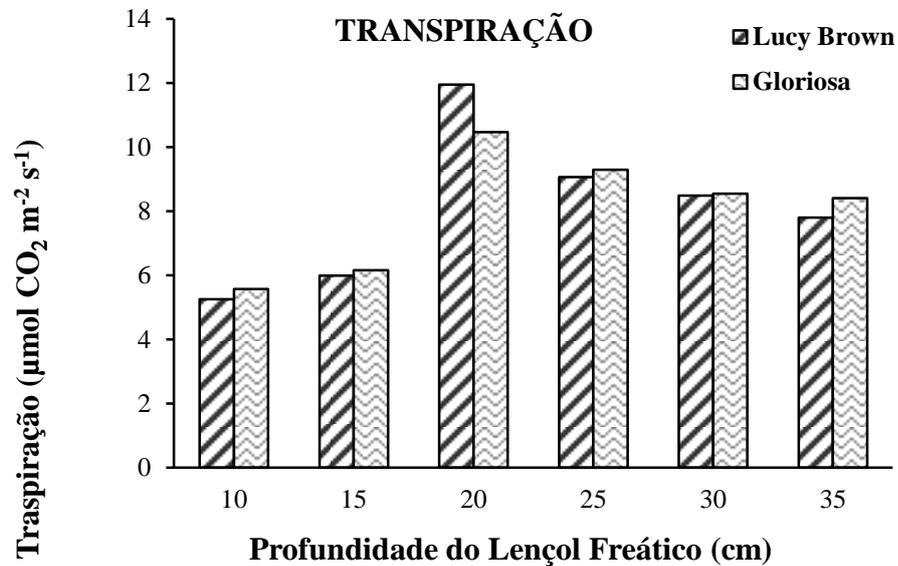


Fonte: o próprio autor.

Desempenhos idênticos entre condutância estomática e transpiração são geralmente esperados e segundo Gonçalves et al., (2010) existe uma relação direta entre as taxas de transpiração e de condutância estomática, uma vez que, segundo estes autores, o fechamento estomático induz uma diminuição do fluxo de vapor d'água para a atmosfera, e, conseqüentemente, da quantidade de água transpirada.

De acordo com Millar (1988), após a inundação de uma cultura se denota uma rápida redução na taxa de transpiração. Em alguns casos, tem-se apresentado certas manifestações de recuperação da taxa de transpiração durante a inundação, o que se tem relacionado com o desenvolvimento das raízes adventícias. A taxa de transpiração é afetada pelo excesso de água no solo da mesma forma que a fotossíntese. Em alguns casos foi observado que o efeito do excesso de água sobre a fotossíntese é maior que no caso da transpiração e um aumento na taxa de respiração depois da inundação.

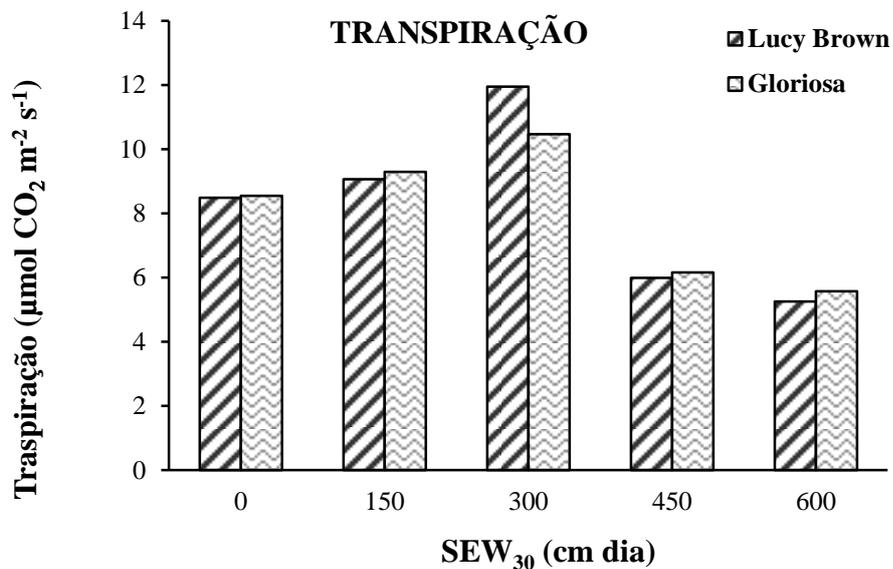
Figura 14 - Transpiração em cultivares de alface em função de níveis do lençol freático.



Fonte: o próprio autor.

Neste trabalho observou-se que os índices de estresse por déficit hídrico (Figura 15) foram mais impactantes nos resultados das taxas de transpiração que os de estresse por excesso de água. Isto ocorre porque quando as plantas fecham os estômatos diminui a taxa de transpiração e consequentemente diminui a perda de água para a atmosfera.

Figura 15 - Transpiração em cultivares de alface em função do índice SEW₃₀.

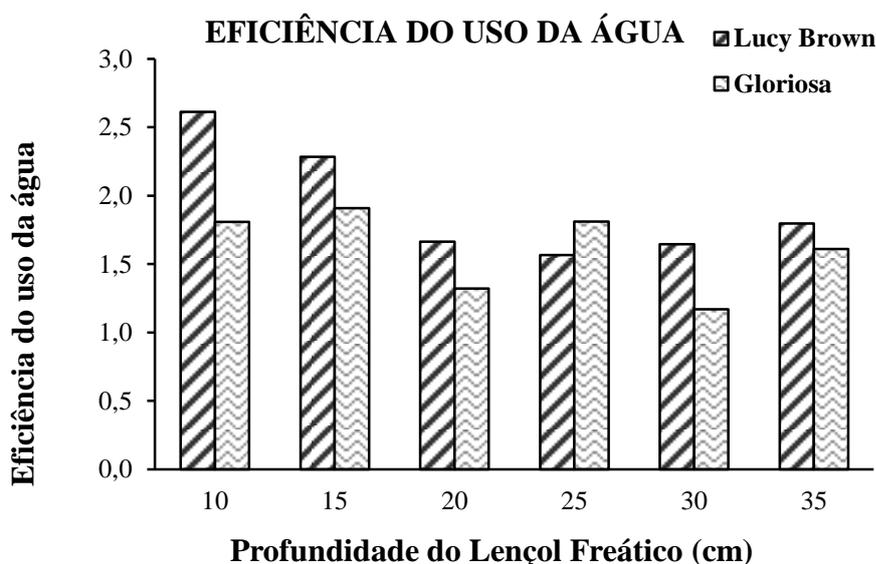


Fonte: o próprio autor.

Em relação à eficiência do uso da água (Figura 16) foi observado que esta variável obteve um comportamento inverso às demais variáveis. Nas condições de estresse por déficit ou por excesso, os resultados foram melhores que na condição de lençol próximo da zona radicular.

Tal fato corrobora com a pesquisa desenvolvida por Bandeira et al. (2011), que obtiveram resultados relativos à eficiência do uso de água, os quais revelaram resposta linear decrescente com o aumento dos níveis de irrigação, significando que a cultura responde melhor à aplicação de pequenas lâminas de irrigação, porém com alta frequência, condição próxima a deste estudo, visto a manutenção dos níveis de lençol freático.

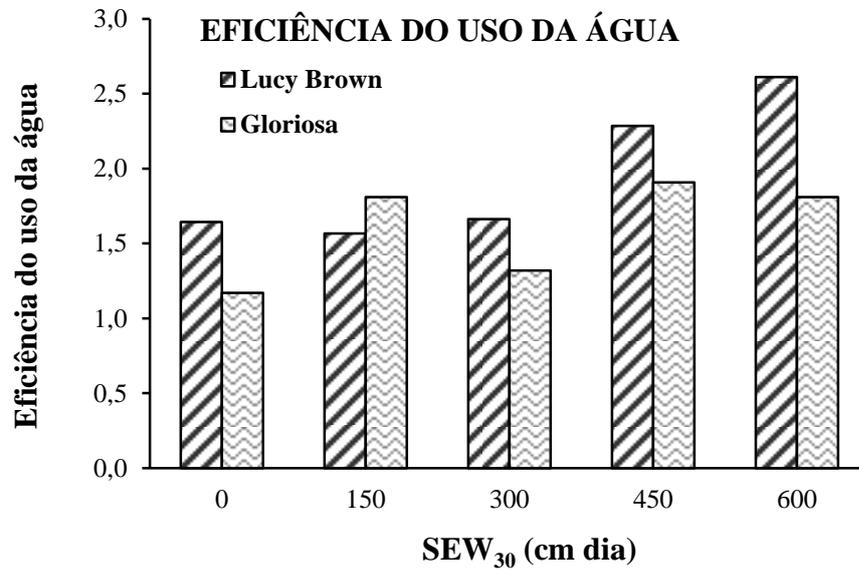
Figura 16 - Eficiência do uso da água das cultivares de alface em função de níveis do lençol freático.



Fonte: o próprio autor.

As respostas dos índices de estresse SEW_{30} (Figura 17) também demonstraram o citado comportamento, ao se visualizar que os maiores níveis de eficiência ocorreram com os maiores índices de estresse. Hamada (1993), objetivando analisar a resposta da alface à aplicação de diferentes lâminas de irrigação verificou que a maior eficiência do uso de água foi obtida no tratamento com a menor lâmina de irrigação aplicada (0,6 da eficiência do uso de água).

Figura 17 - Relação entre a eficiência do uso da água e o índice de estresse hídrico em duas cultivares de alface.

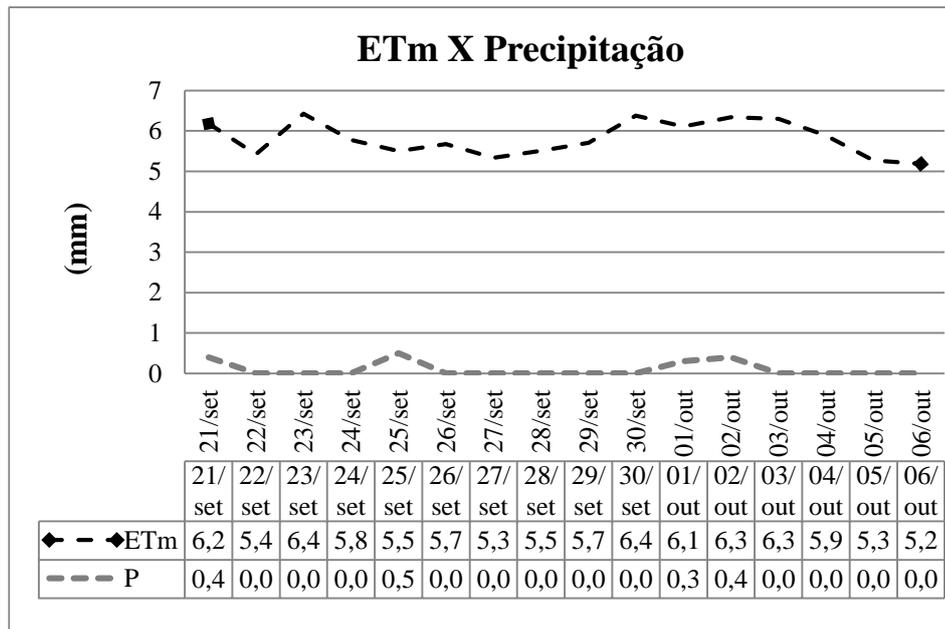


Fonte: o próprio autor.

4.2 Demanda de água da cultura da alface no período do experimento

A partir da série de dados obtida através da Estação Agrometeorológica procedeu-se o acompanhamento diário das demandas hídricas da cultura no período monitorado, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 18 - Dados de precipitação e evapotranspiração máxima (ETm) da cultura.



Fonte: o próprio autor.

É possível observar que para o período em análise, a demanda hídrica diária da cultura variou de 5,1 a 6,4 mm e que praticamente não houve precipitação pluviométrica. Desta forma, pode-se afirmar que os resultados e os cálculos de fluxos de ascensão capilar não foram influenciados significativamente por possíveis eventos de chuva.

Através da Tabela 5, é possível observar diariamente as variações de cada um dos fatores climáticos que constituíram o cálculo da demanda evapotranspirada da cultura no período de monitoramento. É possível observar cada fator e perceber que a variação para o período foi mínima. Destaca-se que a evapotranspiração máxima da cultura ocorrida em dois dias da série, foi de 6,4 mm e que em apenas quatro dias houve registro de precipitação pluviométrica que em nenhum destes atingiu valor superior a 0,5 mm.

Tabela 5- Dados obtidos através da Estação Agroclimatológica para o período monitorado (21/09/2016 – 06/10/2016).

T Máx. °C	UR. %	V. Vento m/s	Ins. H	Rad. MJ/m ² /dia	ET₀ mm/dia	Kc	ET_M mm	P mm
31,0	67	4,7	10,6	25,8	6,5	0,95	6,2	0,4
31,0	68	3,7	8,1	21,9	5,7	0,95	5,4	0,0
31,0	68	6,8	9,3	23,8	6,8	0,95	6,4	0,0
30,8	69	3,5	10,5	25,7	6,1	0,95	5,8	0,0
30,6	74	3,2	11,0	26,5	5,8	0,95	5,5	0,5
30,8	71	3,7	10,3	25,5	6,0	0,95	5,7	0,0
30,8	73	3,0	10,0	25,0	5,6	0,95	5,3	0,0
30,6	72	6,2	7,1	20,5	5,8	0,95	5,5	0,0
30,2	66	3,8	9,1	23,6	6,0	0,95	5,7	0,0
31,0	66	4,8	10,6	26,0	6,7	0,95	6,4	0,0
30,6	67	4,5	10,6	26,0	6,4	0,95	6,1	0,3
31,6	65	4,0	10,9	26,5	6,7	0,95	6,3	0,4
31,4	67	4,3	11,0	26,7	6,6	0,95	6,3	0,0
30,4	69	3,7	11,1	26,8	6,2	0,95	5,9	0,0
30,2	71	3,3	9,0	23,6	5,6	0,95	5,3	0,0
30,6	71	2,8	8,8	23,3	5,5	0,95	5,2	0,0

Fonte: o próprio autor.

4.3 Potenciais e teores de água no solo para níveis de profundidade do lençol freático

Na Tabela 6 são apresentados os valores de potenciais mátricos e de pressão a 0,20m para os seis níveis de profundidade do lençol freático. De um modo geral, os valores demonstram a sensibilidade do tensiômetro de mercúrio para um cálculo mais preciso do status energético de água no solo. Os valores positivos representam status energético correspondente à presença de um potencial de pressão e, portanto, os valores negativos, os respectivos potenciais mátricos.

Os dados mostram claramente a presença de um potencial de pressão para os níveis de lençol freático às profundidades de 0,10m, 0,15m e 0,20m, conforme era esperado, corroborando com a assertiva exposta anteriormente no que tange à capacidade precisa de leitura do tensiômetro de mercúrio. Os dados demonstram ainda a presença de forças mátricas para níveis de lençol freático mais profundo que 0,20m. Apesar da variação temporal nos dados que representam o status energético da água no solo, a média destes valores permite afirmar da escolha correta do tipo de tensiômetro para pesquisa desta natureza.

Tabela 6– Potenciais mátricos e de pressão(cm de água) a 0,20m para os seis níveis do lençol freático.

DIA	T1 - LF: 0,10m	T2 - LF: 0,15m	T3 - LF: 0,20m	T4 - LF: 0,25m	T5 - LF: 0,30m	T6 - LF: 0,35m
	TS20	TS20	TS20	TS20	TS20	TS20
21/set	10,0	6,3	4,2	-1,8	-11,7	-14,9
22/set	10,0	2,5	5,5	-0,6	-6,6	-13,7
23/set	10,0	3,8	4,2	-4,4	-9,1	-12,4
24/set	10,0	5,0	4,2	-4,4	-6,6	-11,1
25/set	10,0	5,0	3,0	0,7	-5,4	-11,1
26/set	10,0	5,0	4,2	-0,6	-7,9	-16,2
27/set	10,0	5,0	4,2	-0,6	-6,6	-16,2
28/set	10,0	5,0	4,2	-0,6	-5,4	-18,7
29/set	10,0	6,2	6,7	-0,6	-5,4	-18,7
30/set	10,0	5,0	4,2	-0,6	-5,4	-18,7
01/out	10,0	6,2	3,0	-0,6	-6,6	-16,2
02/out	10,0	6,2	4,2	-3,1	-6,6	-18,7
03/out	10,0	6,2	5,5	-3,1	-5,4	-18,7
04/out	10,0	6,2	5,5	-3,1	-5,4	-18,7
05/out	10,0	6,2	5,5	-3,1	-5,4	-20,0
06/out	10,0	5,0	4,2	-3,1	-6,6	-20,0
Média	10,0	5,3	4,5	-1,9	-6,6	-16,5

LF: Lençol freático; TS20: Tensiômetro instalado na profundidade de 0,20m.

Fonte: o próprio autor.

A análise dos valores observados confirma a aplicação dos tratamentos através do monitoramento nos piezômetros presentes nos lisímetros, onde foi possível observar uma evolução no status energético da água no solo, iniciando-se com potenciais de pressão de 10cm de água no tratamento com o lençol mais próximo à superfície do solo (0,10m) até valores médios de potenciais mátricos correspondentes a -16,5cm de água no tratamento com o lençol mais profundo (0,35m).

Os valores de potenciais mátricos tornaram-se mais negativos a maiores profundidades, conforme esperado, não obstante mesmo para a profundidade de lençol freático a 0,35m o maior valor alcançado tenha correspondido a apenas 1/3 da tensão relativa à capacidade de campo, podendo tal fato estar associado aos efeitos da umidade acima do lençol freático, também conhecida como franja capilar.

Na Tabela 7 são apresentados os valores dos parâmetros empíricos do modelo de van Genuchten e de atributos físicos do solo que permitiram a obtenção da equação representativa da curva de retenção de água no solo. Já na Tabela 10 observam-se os dados de conteúdo de água no solo à profundidade de 0,20m para os seis níveis do lençol freático.

Tabela 7– Parâmetros empíricos e atributos físicos do solo para o modelo van Genuchten

θ_{res}	θ_{sat}	α	M	N
0,044	0,39	0,015	0,5	2,5

Fonte: o próprio autor.

$$\theta = 0,044 + \frac{0,39-0,044}{[1+(0,015 \times |\Psi_m|)^{2,5}]^{0,5}} \quad (12)$$

De acordo com a ABNT (1988), a capacidade de campo é considerada como aquela relativa a uma tensão de 60 cm de coluna d'água. De fato, para uma tensão de água no solo correspondente a 0,60m de coluna de água tem-se uma umidade volumétrica correspondente a $0,3042 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, portanto inferior a todos os valores de umidade a 0,20m de profundidade para os seis níveis de lençol freático analisados (Tabela 8 e Figura 19), demonstrando assim a importância da transmissão da umidade no solo logo acima do lençol freático como consequência da franja capilar, mesmo se tratando de um solo de textura arenosa.

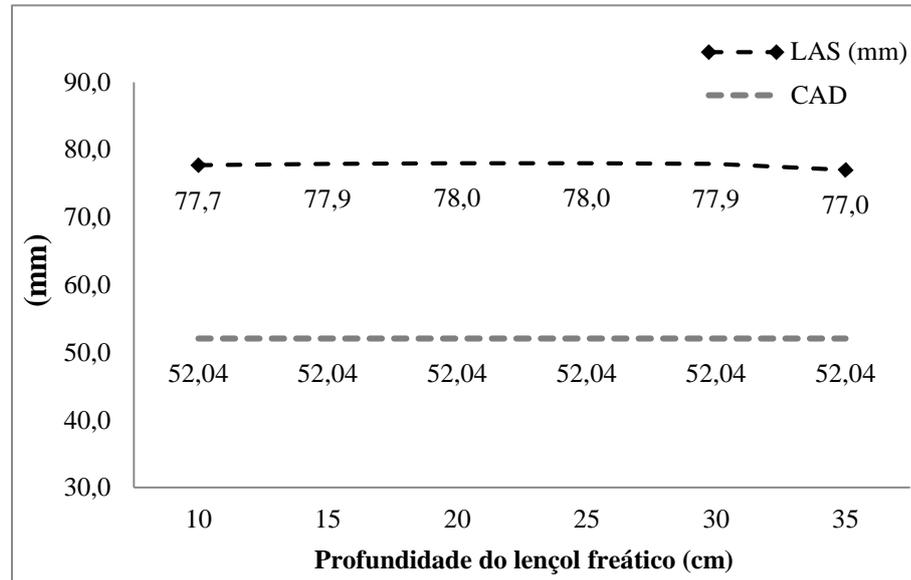
Tabela 8– Conteúdo de água no solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) a 0,20m para os seis níveis do lençol freático

DIA	T1 - LF: 0,10m	T2 - LF: 0,15m	T3 - LF: 0,20m	T4 - LF: 0,25m	T5 - LF: 0,30m	T6 - LF: 0,35m
	θ_{20}	θ_{20}	θ_{20}	θ_{20}	θ_{20}	θ_{20}
21/set	0,3885	0,3895	0,3898	0,3900	0,3878	0,3860
22/set	0,3885	0,3900	0,3897	0,3900	0,3895	0,3867
23/set	0,3885	0,3899	0,3898	0,3898	0,3888	0,3874
24/set	0,3885	0,3897	0,3898	0,3898	0,3895	0,3881
25/set	0,3885	0,3897	0,3899	0,3900	0,3897	0,3881
26/set	0,3885	0,3897	0,3898	0,3900	0,3892	0,3851
27/set	0,3885	0,3897	0,3898	0,3900	0,3895	0,3851
28/set	0,3885	0,3897	0,3898	0,3900	0,3897	0,3830
29/set	0,3885	0,3895	0,3894	0,3900	0,3897	0,3830
30/set	0,3885	0,3897	0,3898	0,3900	0,3897	0,3830
01/out	0,3885	0,3895	0,3899	0,3900	0,3895	0,3851
02/out	0,3885	0,3895	0,3898	0,3899	0,3895	0,3830
03/out	0,3885	0,3895	0,3897	0,3899	0,3897	0,3830
04/out	0,3885	0,3895	0,3897	0,3899	0,3897	0,3830
05/out	0,3885	0,3895	0,3897	0,3899	0,3897	0,3818
06/out	0,3885	0,3897	0,3898	0,3899	0,3895	0,3818
Média	0,3885	0,3897	0,3898	0,3900	0,3895	0,3848
LAS (mm)	77,7	77,9	78,0	78,0	77,9	77,0

LF: Lençol freático; θ_{20} : Umidade volumétrica na profundidade de 0,20m; LAS: Lâmina de água no solo.

Fonte: o próprio autor.

Figura 19 - Lâmina de água no solo (LAS) e capacidade de água disponível (CAD) em função dos níveis de profundidade do lençol freático.



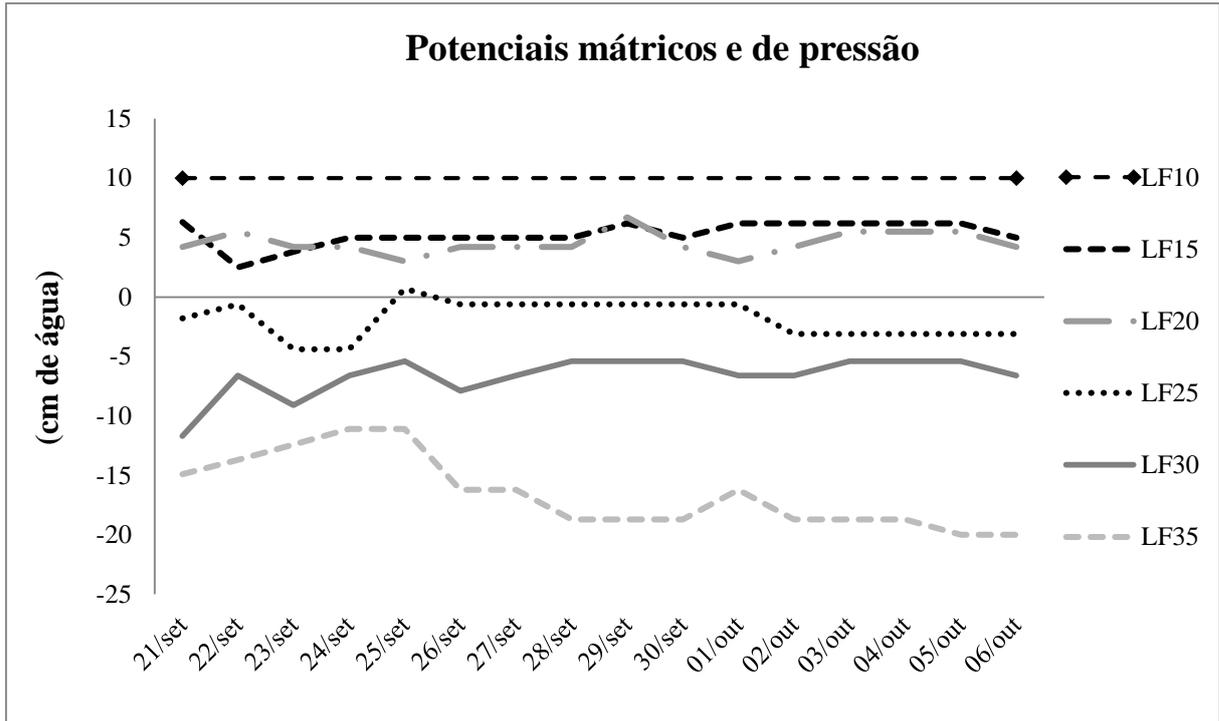
Fonte: o próprio autor.

Os elevados valores do conteúdo de água no solo nos diversos níveis de lençol freático analisados, praticamente correspondentes à saturação, conferem uma lâmina de água no solo na camada de 0 a 0,20 m que chega a superar em 50% a lâmina de água correspondente à capacidade de água disponível.

Nas Figuras 22 e 23 se visualiza no período de 21/set a 06/out para cada um dos níveis de lençol freático, o comportamento dos potenciais mátricos e de pressão, além do teor de água no solo, respectivamente, na profundidade de 0,20m.

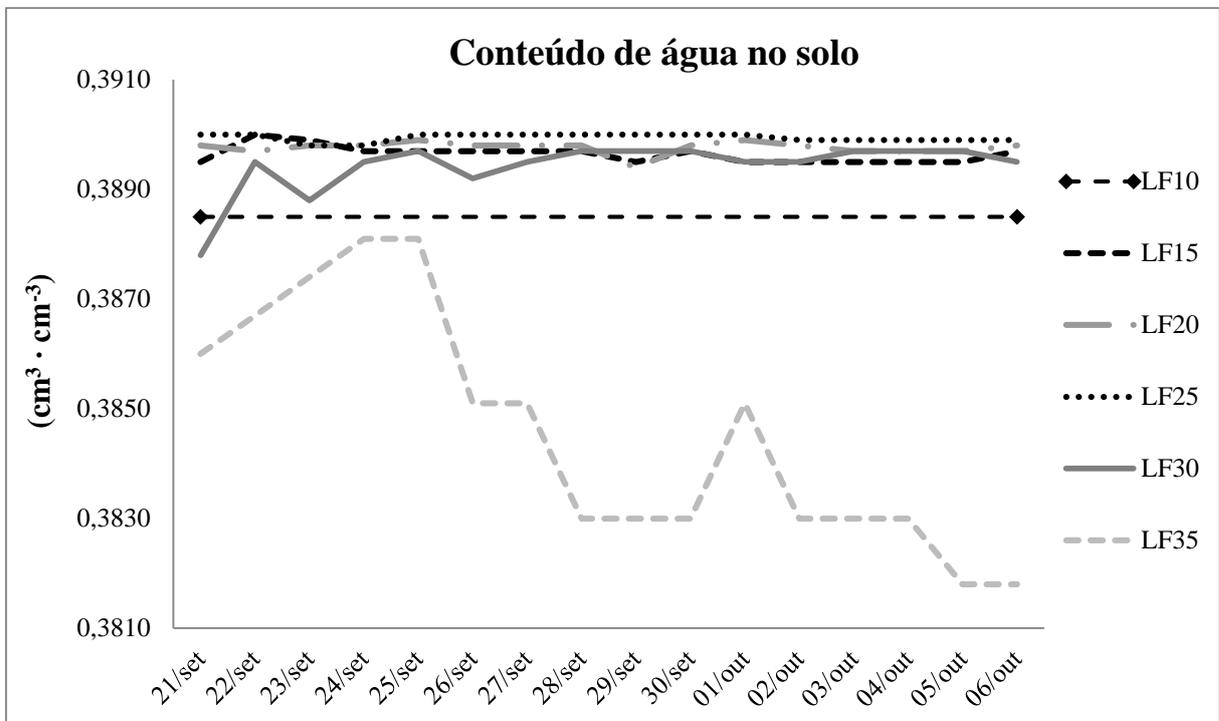
Em conformidade com o comportamento visualizado na Figura 16 observa-se uma bem definida distinção entre os diferentes níveis de lençol freático do ponto de vista dos potenciais (mátricos e de pressão) na profundidade de 0,20m. Isto prova que o modelo físico dos lisímetros de drenagem foi capaz de manter em diferentes profundidades os níveis de lençol freático. É possível notar que o LF10 não sofreu qualquer alteração em todo o período e que a profundidade LF15 e LF20 com o tensiômetro instalado a profundidade de 0,20m mostrou a elevada sensibilidade de se trabalhar com tensiômetro próximo ao nível do lençol freático.

Figura 20 - Comportamento dos potenciais mátricos e de pressão para a profundidade de 0,20m em cada um dos níveis de lençol freático para o período monitorado.



Fonte: o próprio autor.

Figura 21 - Comportamento do teor de água no solo para a profundidade de 0,20m em cada um dos níveis de lençol freático para o período monitorado.



Fonte: o próprio autor.

4.4 Densidade de fluxo por ascensão capilar oriunda do lençol freático

Nas Tabelas 09 e 10 verificam-se os valores de potenciais mátricos e potenciais totais da água no solo expressos em cm de coluna de água nas profundidades de 0,10m e 0,30m para os seis níveis de lençol freático referentes ao período de 21/set a 06/out. Na Figura 18 se visualiza a representação gráfica da componente potencial total em função do tempo.

Tabela 9- Potenciais de pressão e mátricos de água no solo (cm H₂O) nas profundidades de 0,10m e 0,30m para os seis níveis de profundidade do lençol freático.

DIA	T1 - LF: 0,10m		T2 - LF: 0,15m		T3 - LF: 0,20m		T4 - LF: 0,25m		T5 - LF: 0,30m		T6 - LF: 0,35m	
	TS1	TS3										
21/set	1,3	20,0	2,5	20,0	-5,8	36,9	-11,8	8,2	-21,7	-1,7	-24,9	-4,9
22/set	0,0	20,0	-7,5	13,7	-5,8	24,3	-10,6	9,4	-16,6	3,4	-23,7	-2,4
23/set	1,3	20,0	-12,6	6,2	-5,8	15,5	-15,6	5,6	-19,1	2,1	-22,4	-2,4
24/set	1,3	20,0	-5,0	15,0	-5,8	15,5	-14,4	5,6	-16,6	3,4	-21,1	-1,1
25/set	1,3	20,0	-5,0	16,2	-7,0	14,2	-10,6	10,7	-15,4	4,6	-21,1	0,1
26/set	1,3	20,0	-5,0	16,2	-5,8	18,0	-9,3	9,4	-17,9	3,4	-24,9	-7,4
27/set	0,0	20,0	-5,0	16,2	-5,8	16,7	-10,6	9,4	-16,6	4,6	-24,9	-6,2
28/set	0,0	20,0	-5,0	16,2	-5,8	16,7	-10,6	9,4	-15,4	4,6	-24,9	-6,2
29/set	0,0	21,3	-5,0	16,2	-4,5	16,7	-10,6	9,4	-15,4	4,6	-28,7	-8,7
30/set	0,0	20,0	-5,0	16,2	-5,8	15,5	-10,6	9,4	-15,4	5,9	-28,7	-8,7
01/out	0,0	20,0	-3,8	16,2	-7,0	14,2	-11,8	9,4	-16,6	4,6	-26,2	-4,9
02/out	0,0	20,0	-3,8	16,2	-5,8	14,2	-13,1	6,9	-16,6	3,4	-28,7	-8,7
03/out	0,0	20,0	-3,8	16,2	-4,5	15,5	-13,1	6,9	-15,4	4,6	-28,7	-8,7
04/out	0,0	20,0	-5,0	16,2	-5,8	15,5	-13,1	6,9	-15,4	4,6	-30,0	-8,7
05/out	0,0	20,0	-3,8	16,2	-4,5	15,5	-13,1	6,9	-15,4	4,6	-30,0	-10,0
06/out	0,0	20,0	-5,0	16,2	-5,8	14,2	-13,1	6,9	-16,6	3,4	-30,0	-10,0

LF: Lençol freático; TS: Tensiômetro instalado na profundidade TS1= 0,10m e TS3= 0,30m.

Fonte: o próprio autor.

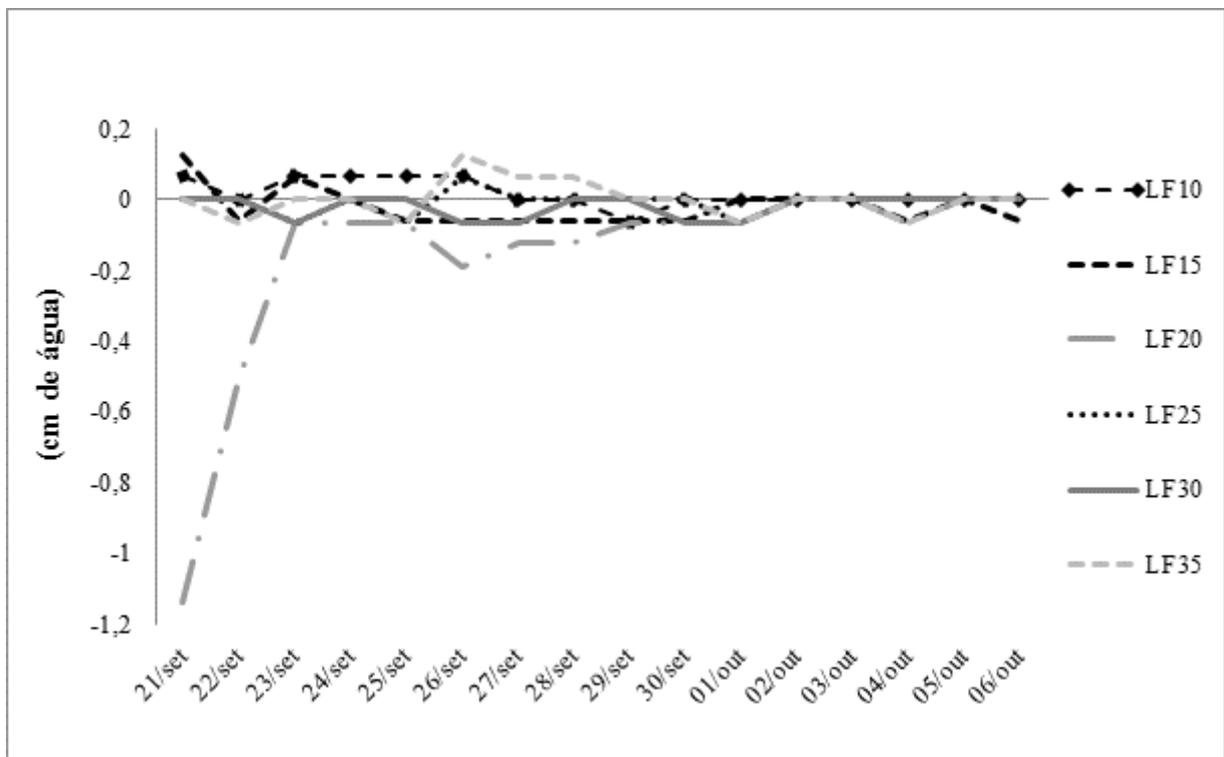
Tabela 10- Potenciais totais de água no solo (cm H₂O) nas profundidades de 0,10m e 0,30m para os seis níveis de profundidade do lençol freático.

DIA	T1 - LF: 0,10m		T2 - LF: 0,15m		T3 - LF: 0,20m		T4 - LF: 0,25m		T5 - LF: 0,30m		T6 - LF: 0,35m	
	TS1	TS3										
21/set	-8,7	-10,0	-7,5	-10,0	-15,8	6,9	-21,8	-21,8	-31,7	-31,7	-34,9	-34,9
22/set	-10,0	-10,0	-17,5	-16,3	-15,8	-5,7	-20,6	-20,6	-26,6	-26,6	-33,7	-32,4
23/set	-8,7	-10,0	-22,6	-23,8	-15,8	-14,5	-25,6	-24,4	-29,1	-27,9	-32,4	-32,4
24/set	-8,7	-10,0	-15,0	-15,0	-15,8	-14,5	-24,4	-24,4	-26,6	-26,6	-31,1	-31,1
25/set	-8,7	-10,0	-15,0	-13,8	-17,0	-15,8	-20,6	-19,3	-25,4	-25,4	-31,1	-29,9
26/set	-8,7	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-12,0	-19,3	-20,6	-27,9	-26,6	-34,9	-37,4
27/set	-10,0	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-13,3	-20,6	-20,6	-26,6	-25,4	-34,9	-36,2
28/set	-10,0	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-13,3	-20,6	-20,6	-25,4	-25,4	-34,9	-36,2
29/set	-10,0	-8,7	-15,0	-13,8	-14,5	-13,3	-20,6	-20,6	-25,4	-25,4	-38,7	-38,7
30/set	-10,0	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-14,5	-20,6	-20,6	-25,4	-24,1	-38,7	-38,7
01/out	-10,0	-10,0	-13,8	-13,8	-17,0	-15,8	-21,8	-20,6	-26,6	-25,4	-36,2	-34,9
02/out	-10,0	-10,0	-13,8	-13,8	-15,8	-15,8	-23,1	-23,1	-26,6	-26,6	-38,7	-38,7
03/out	-10,0	-10,0	-13,8	-13,8	-14,5	-14,5	-23,1	-23,1	-25,4	-25,4	-38,7	-38,7
04/out	-10,0	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-14,5	-23,1	-23,1	-25,4	-25,4	-40,0	-38,7
05/out	-10,0	-10,0	-13,8	-13,8	-14,5	-14,5	-23,1	-23,1	-25,4	-25,4	-40,0	-40,0
06/out	-10,0	-10,0	-15,0	-13,8	-15,8	-15,8	-23,1	-23,1	-26,6	-26,6	-40,0	-40,0

LF: Lençol freático; TS: Tensiômetro instalado na profundidade TS1= 0,10m e TS3= 0,30m.

Fonte: o próprio autor.

Figura 22 - Potencial total de água no solo para o período monitorado.



Fonte: o próprio autor.

Os valores de gradientes de potencial total da água no solo (Tabela 11) entre as profundidades de 0,10m e 0,30m da superfície do solo, ao contrário das condições de fluxo com

ausência de lençol freático, foram muito reduzidos, quando não nulos, em face da reduzida variação do potencial total para as duas profundidades. Valores negativos do gradiente de potencial total da água no solo indicam fluxo no sentido ascendente ou uma ascensão capilar.

A utilização de gradientes unitários na estimativa da densidade de fluxo, conforme sugerida por alguns autores, dentre eles Libardi (2012), Yang et al. (2007), Black et al. (1969) e Davidson et al. (1969), acarretaria para as condições da presente pesquisa estimativas bastante grosseiras.

Tabela 11- Gradientes de potencial total da água no solo (cm cm^{-1}) entre as profundidades de 0,10m e 0,30m da superfície do solo.

DIA	$\delta\Psi_T/\delta Z$ (cm cm^{-1})					
	LF10	LF15	LF20	LF25	LF30	LF35
21/set	0,065	0,125	-1,135	0,000	0,000	0,000
22/set	0,000	-0,063	-0,505	0,000	0,000	-0,065
23/set	0,065	0,063	-0,065	-0,065	-0,065	0,000
24/set	0,065	0,000	-0,065	0,000	0,000	0,000
25/set	0,065	-0,063	-0,065	-0,065	0,000	-0,065
26/set	0,065	-0,063	-0,190	0,065	-0,065	0,125
27/set	0,000	-0,063	-0,125	0,000	-0,065	0,065
28/set	0,000	-0,063	-0,125	0,000	0,000	0,065
29/set	-0,065	-0,063	-0,065	0,000	0,000	0,000
30/set	0,000	-0,063	-0,065	0,000	-0,065	0,000
01/out	0,000	0,000	-0,065	-0,065	-0,065	-0,065
02/out	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
03/out	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
04/out	0,000	-0,063	-0,065	0,000	0,000	-0,065
05/out	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
06/out	0,000	-0,063	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: o próprio autor.

Tendo em vista a susceptibilidade da ocorrência de erros instrumentais na coleta de dados não serem raros, torna-se fundamental a estimativa de valores de umidade com maior grau de precisão, diminuindo dessa forma erros na obtenção da condutividade hidráulica. É fácil observar para as condições da presente pesquisa que para uma umidade do solo de $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ tem-se um valor de condutividade de $3,62 \text{ mm dia}^{-1}$ e que para as condições de fluxo saturado ou umidade de $0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a condutividade chega a ser quase 3000 vezes maior.

Reichardt et al. (1993) em estudos sobre estimativa de fluxo de água em solos não saturados, observaram com base no modelo exponencial da função $K(\theta)$, que uma variação de umidade da ordem de 2%, que é praticamente indetectável e que está dentro dos erros de medida de umidade, a condutividade hidráulica praticamente triplica seu valor.

Na Tabela 12 são apresentados os valores de condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ em mm dia^{-1} a 0,20m para os seis níveis do lençol freático. Considerando que os dados de umidade no solo foram obtidos indiretamente através da curva de retenção para potenciais mátricos calculados de um tensiômetro instalado a 0,20m, os níveis de profundidades do lençol freático correspondentes a 0,25m, 0,30m e 0,35m da superfície do solo corresponderão a fluxos oriundos do lençol freático às profundidades de 0,05m, 0,10m e 0,15m. Apesar da baixíssima variação nos níveis de umidade do solo nestas profundidades, verifica-se uma redução significativa no valor de $K(\theta)$.

Tabela 12- Condutividade hidráulica do solo $K(\theta)$ em mm dia^{-1} a 0,20m para os seis níveis do lençol freático.

DIA	T1 - LF: 0,10m	T2 - LF: 0,15m	T3 - LF: 0,20m	T4 - LF: 0,25m	T5 - LF: 0,30m	T6 - LF: 0,35m
	$K(\theta)$	$K(\theta)$	$K(\theta)$	$K(\theta)$	$K(\theta)$	$K(\theta)$
21/set	8000,8	9772,2	10376,5	10800,0	6955,6	4852,7
22/set	8000,8	10800,0	10171,1	10800,0	9772,2	5582,0
23/set	8000,8	10586,1	10376,5	10376,5	8495,6	6420,8
24/set	8000,8	10171,1	10376,5	10376,5	9772,2	7385,7
25/set	8000,8	10171,1	10586,1	10800,0	10171,1	7385,7
26/set	8000,8	10171,1	10376,5	10800,0	9203,1	4053,3
27/set	8000,8	10171,1	10376,5	10800,0	9772,2	4053,3
28/set	8000,8	10171,1	10376,5	10800,0	10171,1	2663,2
29/set	8000,8	9772,2	9578,7	10800,0	10171,1	2663,2
30/set	8000,8	10171,1	10376,5	10800,0	10171,1	2663,2
01/out	8000,8	9772,2	10586,1	10800,0	9772,2	4053,3
02/out	8000,8	9772,2	10376,5	10586,1	9772,2	2663,2
03/out	8000,8	9772,2	10171,1	10586,1	10171,1	2663,2
04/out	8000,8	9772,2	10171,1	10586,1	10171,1	2663,2
05/out	8000,8	9772,2	10171,1	10586,1	10171,1	2095,0
06/out	8000,8	10171,1	10376,5	10586,1	9772,2	2095,0
Média	8000,8	10171,1	10376,5	10800,0	9772,2	3817,3

Fonte: o próprio autor.

A taxa de ascensão capilar constitui em parâmetro de difícil estimativa por ser bastante influenciada pelas características físico-hídricas do solo, portanto, sendo passíveis de erros na coleta dos dados. Tendo em vista as dificuldades para estimar a ascensão capilar, alguns autores consideram-na desprezível (VALNIR JUNIOR et al., 2001).

Conforme a equação de Darcy-Buckingham, o fluxo de água no solo é impulsionado por um gradiente de potencial total e não por um gradiente de umidade.

O movimento dá-se no sentido do decréscimo do potencial total, isto é, a água se move de pontos de maior potencial total para os pontos de menor potencial total. É importante ressaltar que, além do potencial total da água Ψ_T , a condutividade hidráulica também determina o comportamento do fluxo (Libardi, 1995), como é o caso da presente pesquisa, considerando os reduzidos valores dos gradientes de potencial total.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de densidade de fluxo da água no solo, q , em mm dia^{-1} para os seis níveis do lençol freático, nos quais valores positivos representam fluxo no sentido ascendente. Verifica-se que à exceção das menores profundidades do lençol freático, para profundidades do lençol freático igual ou superior a 0,20m, a contribuição por ascensão capilar oriunda do lençol freático apresenta valores cujas magnitudes chegam a superar com bastante folga a necessidade de água da cultura.

Tabela 13- Densidade de fluxo em mm dia^{-1} para os seis níveis do lençol freático.

DIA	T1 - LF: 0,10m	T2 - LF: 0,15m	T3 - LF: 0,20m	T4 - LF: 0,25m	T5 - LF: 0,30m	T6 - LF: 0,35m
	q	q	q	q	q	Q
21/set	-520,1	-1221,5	-	0,0	0,0	0,0
22/set	0,0	680,4	-	0,0	0,0	362,8
23/set	-520,1	-666,9	674,5	674,5	552,2	0,0
24/set	-520,1	0,0	674,5	0,0	0,0	0,0
25/set	-520,1	640,8	688,1	702,0	0,0	480,1
26/set	-520,1	640,8	1971,5	702,0	598,2	506,7
27/set	0,0	640,8	1297,1	0,0	635,2	263,5
28/set	0,0	640,8	1297,1	0,0	0,0	173,1
29/set	-520,1	615,6	622,6	0,0	0,0	0,0
30/set	0,0	640,8	674,5	0,0	661,1	0,0
01/out	0,0	0,0	688,1	702,0	635,2	263,5
02/out	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
03/out	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
04/out	0,0	615,6	661,1	0,0	0,0	173,1
05/out	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
06/out	0,0	640,8	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: o próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A relação física fator-produto sinaliza para um lençol freático a 0,20m como a opção mais viável em termos de resposta da cultura.

No cultivo da alface americana para condições de excesso de água no solo deve-se dar preferência ao estabelecimento da cultivar Gloriosa em detrimento da cultivar Lucy Brow.

Os elevados valores de densidade de fluxo por ascensão capilar, sobretudo em profundidades do lençol freático a partir de 0,20m permitiram corroborar com a premissa da tese, ou seja, foram capazes de suprir as necessidades hídricas da cultura.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos para elaboração de projetos de drenagem subterrânea para fins agrícolas**. Rio de Janeiro, ABNT, 1998, 3p. NBR 14144: 1998.
- AHMAD, M. U. D.; BASTIAANSEN, W. G. M.; FEDDES, R. A. Sustainable use of groundwater for irrigation: a numerical analysis of the subsoil water fluxes. **Irrigation and Drainage**, [S. l.]: n. 51, p. 227–241. 2002.
- AZEVEDO, J. A. D.; SILVA, E. M. D. **Tensiômetro: dispositivo pratico para controle da irrigacao**. EMBRAPA. Planaltina-DF, p.37. 1999
- BANDEIRA, G. R. L. *et al.* Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**. [S. l.]: n. 29, p. 237-241. 2011.
- BENGTSON, R. L. *et al.* **Corn silage responses to subsurface drainage on alluvial soil**. *Transactions of the ASAE* 30. [S. l.]: 1391-1395. 1984.
- BIASSUSI, M. **Simulação do movimento da água no solo utilizando modelo numérico**. 2001. 81f. Tese (Doutorado). Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- BLACK, T. A.; GARDNER, W. R.; THURTELL, G. W. The prediction of evaporation drainage and soil water storage for a bare soil. **Soil Science Society American Proceedings**. [S. l.]: v.33, p. 655–60, 1969.
- BLAT, S. F. *et al.* Desempenho de cultivares de alface crespa em dois ambientes de cultivo em sistema hidropônico. **Horticultura Brasileira**. [S. l.]:v. 29, n. 1, p. 135-138, 2011.
- BOUWER, H. Developing drainage design criteria. In: SCHILFGAARDE, V., **Drainage for agriculture**, 1974. Madison. American Society of Agronomy. p.67 - 69.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 716p.
- CARTER, C. C. *et al.* **Effects of excess soil water on sweet corn yield**. *Transactions of the ASAE*, 1990. St. Joseph. p.1203-1207.
- COSTA, R. N. T. **Espaçamento econômico de drenos laterais e a dinâmica do lençol freático sobre o rendimento da cultura de milho**. 1994. 88 p. Tese (doutorado). Departamento de Engenharia Rural, ESALQ, Piracicaba.
- CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura**. 4. São Paulo: Nobel, 1987. 337p.
- DARDANELLI, J. L.; COLLINO, D. Estimation of the water table contribution to alfalfa crops in the Argentinean Pampa Region. **Agriscientia**, [S. l.]: n.19, p.11-18. 2002.

DAVIDSON, J. M. *et al.* Field measurement and use of soil water properties. **Water Resource Research**. [S. l.]: v.6, p.549-53, 1969.

DEMUNER, A. P. V. *et al.* Emergência de plântulas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) em diferentes tensões de retenção de água no solo. **Revista Thema**, [S. l.]: v. 14, n. 4, p. 14 - 24, 2017.

DOURADO NETO, D. *et al.* **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3.0 beta)**. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001. Disponível em: <<http://docentes.esalq.usp.br/dourado/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F.; MIRANDA, J. H.; MEDEIROS, J. F.; COSTA, R. N. T.; GHEYI, H. R. **Fundamentos de drenagem agrícola**. Fortaleza: INCTSal, 2015. 356p.

FAO. **Drainage design factors**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, 1980. 117p. (Irrigation and Drainage Paper, 26).

FERRAREZI, R. S. *et al.* Altura da lâmina, tempo e volume de enchimento de um equipamento de irrigação por pavio e determinação da uniformidade de distribuição de água em substratos. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 273-281, 2012.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2013. 421 p.

FLECHA, P. A. N. **Sensibilidade das culturas da batata (*Solanum tuberosum* L.) e da alface (*Lactuca sativa* L.) ao excesso de água no solo**. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 68 p. - Piracicaba, 2004.

FREIRE, A. G. **Estimativa de parâmetros hidráulicos do solo utilizando tensiometria com alguns sistemas de leitura**. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará. 52 p. - Fortaleza, 2016.

GOMES, E. P.; SOUSA, A. P. Produtividade da alface (*Lactuca sativa* L.) em função dos valores de lâminas de água aplicados por gotejamento superficial e subsuperficial. **Irriga**, Botucatu, SP, v. 7, n. 1, 2002.

GONÇALVES, E. R. *et al.* Trocas gasosas e fluorescência da clorofila a em variedades de cana-de-açúcar submetidas à deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.]: v. 14, n. 4, p. 378-386, 2010.

GRISMER, M. E.; GATES, T. K. Estimating saline water table contribution to crop water use. **Calif. Agric.** [S. l.]: n.42, p.23-24. 1988.

HAMADA E. **Desenvolvimento e produtividade da alface (*Lactuca sativa* L.), submetida a diferentes lâminas de irrigação, através da irrigação por gotejamento**. Dissertação (mestrado). Campinas: UNICAMP-FAEA. 102p. 1993.

HILER, E. A. Quantitative evaluation of crop-drainage requirements. **Transactions of the ASAE**, 1969. St. Joseph. p.499-505.

- HILER, E. A.; CLARK, R. N. Stress day index to characterize effects of water stress on crop yields. **Transactions of the ASAE**, 1971. St. Joseph. p.757-761.
- HILER, E. A.; CLARK, R. N.; GLASS, L. J. Effects of water table height on soil aeration and crop response. **Transactions of the ASAE**, 1971. St. Joseph. p.879-882.
- HILLEL, D. KRENTOS, V. D. STYLIANOU, Y. Procedure and test of na internal drainage method for mesuring soil hydraulic characteristics *in situ*. **Soil Science**, [S. l.]: v. 114, p.395-400, 1972.
- HILLEL, D.; TALPAZ, H.; VAN KEULEN, H. A macroscopic-scale model of water uptake by a nonuniform root system and of water and salt movement in the soil profile. **Soil Science**, v. 121, [S. l.]: n. 4, p. p. 242-255, 1976.
- HUO, Z. *et al.* Simulation of hydrology following various volumes of irrigation to soil with different depths to the water table. **Soil Use and Management**. [S. l.]: v. 28, p. 229–239, June 2012.
- JIANG, Y.; WANG, K. Growth, physiological, and anatomical responses of creeping bentgrass cultivars to different depths of waterlogging. **Crop Science**. [S. l.]: v. 46: p. 2420 – 2426, 2006.
- KAHLOWN, M. A.; AZAM, M. Individual and combined effectof waterlogging and salinity on crop yields in the Indus basin. **Irrigation and Drainage**. [S. l.]: v. 51, p; 329–338. 2002.
- KAHLOWN, M. A.; ASHRAF, M.; ZIA-UL-HAQ, M. Effect of shallow groundwater table on crop water requirementand crop yields. **Agricultural Water Management**, [S. l.]: v. 76, p. 24–35. 2005.
- KANWAR, R. S.; BAKER, J. L.; MUKHTAR, J. L. Excessive soil water effects at various stages of development on the growth and yield of corn. **Transactions of the ASAE**, 1988. St. Joseph. p. 133-141.
- KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara, 2004. 452 p.
- KIRKHAM, M. B. **Principles of Soil and Plant Water Relations**. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. 519p.
- KLUTE, A. Water retention. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis, Part 1**. Physical and Mineralogical Methods - Agronomy Monograph no. 9. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p. 635–662.
- KOETZ, M. *et al.* Efeito de doses de potássio e da frequência de irrigação na produção da alface-americana em ambiente protegido. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 3, p. 730-737, 2006.
- KRON, A. P. et al. Water deficiency at different developmental stages of glycinemax can improve drought tolerance. **Bragantia**, Campinas, v. 67, p. 43-49, 2009.

LEMOS NETO, H. D. S. **Influência da temperatura na germinação e de espaçamentos na produção em cultivares de alface sob baixa altitude e latitude**. 2015. 71 f. Dissertação (mestrado). Departamento de Fitotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: Ed. do Autor, 1995. 497p.

_____. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. São Paulo: EDUSP, 2012. 352p.

MELO, T. M. *et al.* Avaliação do atendimento da demanda hídrica da cultura do milho através da subirrigação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v.4, n.4, p.226–233, 2010

MILLAR, A. A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas**. São Paulo: Editerra Editorial Ltda. 1988. 306 p.

NASCIMENTO FILHO, A. A. D. **Excesso de água no solo sobre o desenvolvimento da grama Bermuda**. 2013. 49f. Dissertação (mestrado). Departamento de Ciências do Solo, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

NUNES, K. G. **Comportamento da alface-americana sob diferentes doses de composto orgânico e lâminas de irrigação**. 2014. 60f. Dissertação (mestrado). Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

OBREZA, T.A.; YAMATAKI, H.; PEARLSTINE, L.G. Classification of land suitability for citrus production using Drainmod. **Journal of Soil and Water Conservation**. [S. l.]: v.48, no1: p.58-64, 1993.

PAIVA, A. S. *et al.* Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Revista de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, p. 161-169. 2005.

PAVANI, L. C.; LOPES, A. S.; GALBEIRO, R. B. Manejo da irrigação na cultura do feijoeiro em sistemas plantio direto e convencional. **Engenharia Agrícola**, [S. l.]: v. 28, n. 1, p. p.12-21, 2008.

PEREIRA, A. J. *et al.* Efeito dos níveis de reposição e frequência de irrigação sobre a produção e qualidade do rabanete. **Revista de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S. l.]: v. 3, n. 1, p. 117-120, 1999.

RAMOS, G. Monitoramento do nível do lençol freático do Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG. **II seminário de recursos hídricos da bacia hidrográfica do Paraíba do Sul: Recuperação de áreas degradadas**, [S. l.: s. n.]. 2009.p. 633-640.

RAVA, C. A.; COSTA, J. G. C.; AIDAR, H.; KLUTHCOUSKI, J. Produção de sementes de feijoeiro comum livres de *Colletotrichum lindemuthianum* em várzeas tropicais irrigadas por subirrigação. Santo Antônio de Goiás: **Embrapa Arroz e Feijão - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 1. 2002. 16 p.

REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas**. Piracicaba, Editora Manole, 1987, 188p.

REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S., VILLAGRA, M. M. Estimativa de fluxos de água em solos não saturados. **Bragantia**, [S. l.]: v.52, p.83-7, 1993.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri: Manole, 2012.

RESENDE, F. V. *et al.* **Cultivo de alface em sistema orgânico de produção**. Embrapa, Circular Técnica 56. Brasília, DF, 2007.

ROJAS, R. M. **Drenaje Superficial de tierras agrícolas**. Brasilia: Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y tierras, 1984. 95 p.

ROMANO, N., BRUNONE, B., SANTINI, A. Numerical analysis of one-dimensional unsaturated flow in layered soils. **Advances in Water Resources**. [S. l.]: v. 21, p. 315–324, 1998.

SÁ, J. S. D. **Influência do manejo do nível freático e doses de nitrogênio em culturas sob hipoxia no solo**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2005. p. 167.

SAEG. **Sistema para Análises Estatísticas, Versão 9.1**. Fundação Arthur Bernardes – UFV – Viçosa, 2007.

SEPASKHAH, A. R.; KANOONI, A.; GHASEMI, M. M. Estimating water table contributions to corn and sorghum water use. **Agricultural Water Management**. v. 58, p. 67-79, 2003.

SOPPE, R. W. O.; AYARS, J. E. Characterizing groundwater use by safflower using lysimeters. **Agricultural Water Management**. [S. l.]: n. 60, p. 59–71. 2003.

SOUSA, V. F. *et al.* **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011.

SOUZA, C. C. *et al.* Manejo da irrigação e da adubação nitrogenada cultura do algodoeiro herbáceo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. [S. l.]: v.3, n.2, p.125-130, 1999.

SUINAGA, F. A. *et al.* **Desempenho produtivo de cultivares de alface crespa**. Brasília: Embrapa, 2013. 15p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 89)

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

TEIXEIRA, W. G. **Land use effects on Soil Physical and Hydraulic Properties of a Clayey Ferralsol in the Central Amazon**. University of Bayreuth. Bayreuth - Alemanha Tese (doutorado). 255p. 2001.

VALNIR JÚNIOR, M.; COSTA, R. N. T.; AGUIAR, J. V. Análise de componentes do balanço hídrico em cultura de Caupi (*Vigna unguiculata* (L) Walp), sob condições de recarga hídrica natural. **Irriga**. Botucatu, v. 06, n. 3, p. 91-103, setembro-dezembro, 2001.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**. [S. l.]: v.44, p.892-898, 1980.

WESSELING, J. Crop growth and wet soils. In: SCHILFGAARDE, V., **Drainage for agriculture**, 1974. Madison. American Society of Agronomy. p.7 - 37.

YANG, J. *et al.* Water fluxes at a fluctuating water table and groundwater contributions to wheat water use in the lower Yellow River flood plain, China. **Hydrological Processes**, [S. l.]: v. 21, p. 717–724. 2007.

APÊNDICE A – VARIÁVEIS DE PRODUÇÃO DAS CULTIVARES

Tabela 14- Produtividade das cultivares de alface (kg ha⁻¹) em função dos níveis do lençol freático.

CULTIVAR	NÍVEL DO LENÇOL	REPETIÇÃO			Média
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	
C1	-10 cm	13927	12700	13900	13509
	-15 cm	11188	9545	15732	12155
	-20 cm	26904	24617	27656	26392
	-25 cm	3329	3446	3273	3349
	-30 cm	2908	2929	3113	2983
	-35 cm	2683	2825	2868	2792
	TT	4088	3725	4688	4167
C2	-10 cm	16008	16879	15271	16053
	-15 cm	10787	9832	14404	11674
	-20 cm	34413	32363	36315	34363
	-25 cm	6388	4707	5054	5383
	-30 cm	2904	2765	2863	2844
	-35 cm	3008	3050	2592	2883
	TT	3983	4579	4175	4246

Fonte: o próprio autor.

Tabela 15- Condutância estomática das cultivares de alface ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em função dos níveis do lençol freático.

CULTIVAR	NÍVEL DO LENÇOL	REPETIÇÃO			Média
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	
C1	-10 cm	0,28	0,41	0,33	0,34
	-15 cm	0,53	0,32	0,32	0,39
	-20 cm	0,69	0,65	0,74	0,69
	-25 cm	0,55	0,50	0,53	0,52
	-30 cm	0,67	0,63	0,57	0,62
	-35 cm	0,54	0,33	0,56	0,48
	TT	0,36	0,79	0,65	0,60
C2	-10 cm	0,32	0,35	0,64	0,44
	-15 cm	0,61	0,35	0,35	0,44
	-20 cm	0,53	0,54	0,55	0,54
	-25 cm	0,71	0,87	0,55	0,71
	-30 cm	0,62	0,30	0,31	0,41
	-35 cm	0,54	0,58	0,33	0,48
	TT	0,50	0,76	0,58	0,61

Tabela 16- Taxa de fotossíntese ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático.

CULTIVAR	NÍVEL DO LENÇOL	REPETIÇÃO			Média
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	
C1	-10 cm	15,650	11,268	13,801	13,573
	-15 cm	16,195	11,501	13,214	13,637
	-20 cm	15,231	19,176	25,459	19,955
	-25 cm	14,097	14,195	14,230	14,174
	-30 cm	14,053	14,189	14,093	14,112
	-35 cm	16,958	10,495	14,375	13,943
	TT	8,586	20,494	16,933	15,338
C2	-10 cm	12,384	6,357	11,277	10,006
	-15 cm	10,675	8,873	14,572	11,373
	-20 cm	10,660	13,324	17,525	13,836
	-25 cm	10,587	9,587	14,971	11,715
	-30 cm	10,276	8,399	9,813	9,496
	-35 cm	8,522	7,131	6,347	7,333
	TT	16,414	15,942	17,958	16,771

Fonte: o próprio autor.

Tabela 17- Taxa de transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático.

CULTIVAR	NÍVEL DO LENÇOL	REPETIÇÃO			Média
		1 ^a	2 ^a	3 ^a	
C1	-10 cm	5,063	5,735	4,965	5,254
	-15 cm	7,286	5,312	5,356	5,985
	-20 cm	11,763	11,686	12,388	11,945
	-25 cm	9,501	8,950	8,738	9,063
	-30 cm	8,025	8,955	8,475	8,485
	-35 cm	9,078	5,599	8,718	7,798
	TT	6,903	11,182	10,123	9,403
C2	-10 cm	5,024	4,935	6,741	5,566
	-15 cm	7,681	5,293	5,485	6,153
	-20 cm	10,516	10,154	10,721	10,464
	-25 cm	9,737	10,183	7,949	9,290
	-30 cm	11,360	7,176	7,098	8,545
	-35 cm	8,684	9,601	6,938	8,408
	TT	9,384	9,485	9,303	9,390

Fonte: o próprio autor.

Tabela 18– Eficiência do uso da água em cultivares de alface em função dos níveis do lençol freático.

CULTIVAR	NÍVEL DO LENÇOL	REPETIÇÃO			Média
		1ª	2ª	3ª	
C1	-10 cm	3,09	1,96	2,78	2,61
	-15 cm	2,22	2,17	2,47	2,28
	-20 cm	1,29	1,64	2,06	1,66
	-25 cm	1,48	1,59	1,63	1,57
	-30 cm	1,80	1,60	1,53	1,64
	-35 cm	1,87	1,87	1,65	1,80
	TT	1,24	1,83	1,67	1,58
C2	-10 cm	2,47	1,29	1,67	1,81
	-15 cm	1,39	1,68	2,66	1,91
	-20 cm	1,01	1,31	1,63	1,32
	-25 cm	1,90	1,64	1,88	1,81
	-30 cm	0,90	1,22	1,38	1,17
	-35 cm	2,13	1,78	0,91	1,61
	TT	1,75	1,68	1,93	1,79