

TENSIÔMETROS ELETRÔNICOS INTEGRADOS A PLACA MICROCONTROLADORA ARDUINO NO MANEJO DA IRRIGAÇÃO DE ALFACE EM DIFERENTES POTENCIAIS MATRICIAIS CRÍTICOS E TIPOS DE SOLO

RODRIGO MOURA PEREIRA¹; DELVIO SANDRI¹ E GERVÁSIO FERNANDO ALVES RIOS¹

¹Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, S/N, CEP: 70910-900, Brasília, DF, Brasil, rodrigomouracbs@gmail.com, sandri@unb.br, gervasiosrios@yahoo.com.br.

1 RESUMO

O uso racional da água na irrigação é fundamental para a conservação dos recursos hídricos. Nesse sentido, sistemas de automação de irrigação baseados na variação do potencial matricial do solo podem ser empregados como ferramenta para o uso eficiente da água em sistemas irrigados. Objetivou-se avaliar respostas da alface, cv. Wanda, submetida à potenciais matriciais críticos de irrigação controlados por tensiômetros eletrônicos. Os tensiômetros foram integrados a uma placa microcontroladora Arduino para controle da automação de irrigação. Adotou-se o delineamento experimental em blocos completos casualizados com quatro repetições, tendo como potenciais matriciais críticos -15, -20, -25 e -30 kPa em Latossolo Vermelho Amarelo e -10, -15, -20 e -25 kPa em Neossolo Regolítico. Aos 33 dias após o transplante, foram obtidos parâmetros fenométricos da alface, índice Falker de clorofila e a Eficiência do Uso da Água (EUA). O sistema de automação monitorou e registrou os potenciais ao longo do ciclo da alface, acionou e interrompeu a irrigação de acordo com os potenciais críticos adotados. Os potenciais matriciais apresentaram variações médias em relação aos valores críticos para acionamento e interrupção da irrigação entre 1,45% e 5,50% no Latossolo Vermelho Amarelo e entre 2,90% e 15,50% no Neossolo Regolítico, respectivamente. A adoção de potenciais críticos abaixo de -15 kPa em Neossolo reduz significativamente a frequência de irrigação. O maior peso de matéria fresca foi obtido no potencial matricial de -10 kPa em Neossolo Regolítico e a maior EUA foi obtida na irrigação acionada no potencial de -15 kPa em Latossolo Vermelho Amarelo.

Keywords: tensão de água no solo, automação, irrigação de precisão.

**PEREIRA, R. M.; SANDRI, D.; RIOS, G. F. A.
ELECTRONIC TENSIMETERS INTEGRATED WITH ARDUINO
MICROCONTROLLER IN IRRIGATION MANAGEMENT OF LETTUCE
SUBMITTED TO DIFFERENT CRITICAL MATRIC POTENTIALS AND SOIL
TYPES**

2 ABSTRACT

The rational use of water in irrigation is fundamental for the conservation of water resources. Irrigation automation based on the variation of the soil matrix potential can be used as a tool

for the efficient water use in irrigation. This study aimed to evaluate lettuce, cv Wanda responses to soil water potentials for irrigation controlled by electronic tensiometers. The tensiometers were integrated with an Arduino microcontroller to control an irrigation automation system. A randomized complete block design with four replications was adopted, with critical potentials of -15, -20, -25, and -30 kPa in Red Yellow Latosol and -10, -15, -20, and -25 kPa in Regolitic Neossol. At 33 days after transplanting, lettuce phenometric parameters, chlorophyll Falker index, and water use efficiency (EUA) were obtained. The automation system monitored and recorded the potentials throughout the lettuce cycle and triggered and stopped the irrigation according to the critical potentials adopted. The soil water potentials showed average variations to the critical values for starting and stopping irrigation between 1.45% and 5.50% in the Oxisol and between 2.90% and 15.50% in the Regolitic Neossol respectively. The adoption of critical potentials above -15 kPa in Neossolo significantly reduces the frequency of irrigation. The highest fresh matter weight was obtained at the matrix potential of -10 kPa in Regolitic Neossol and the highest EUA was obtained in -15 kPa in the Red Yellow Latosol.

Keywords: soil water tension, automation, precision irrigation

3 INTRODUÇÃO

O uso racional da água no cultivo de hortaliças nos próximos anos irá depender, dentre outros fatores, da eficiência dos sistemas de irrigação controlados por sensores que sejam capazes de evitar os prejuízos causados pela irrigação excessiva ou pelo déficit hídrico, os quais causam, em sistemas ineficientes, desperdício de água e limitação ao crescimento vegetal, respectivamente (MEDICI *et al.*, 2010; VALENÇA *et al.*, 2018). A alface é um vegetal de ciclo curto, de rápido crescimento e possui alta demanda de água e nutrientes, entretanto é capaz de fornecer elevados incrementos de massa fresca durante o seu ciclo (GEISENHOF *et al.*, 2016). Estudos que envolvem secagem lenta do solo com posterior umedecimento completo em vasos de cultivo fornecem um método de imposição de déficit hídrico que minimiza a maioria das situações no campo, o qual é recomendado para o estudo da influência do stress hídrico no desenvolvimento de raízes, absorção de nutrientes, interações raízes e parte aérea e fenotipagem para tolerância à seca (TURNER, 2018).

A abordagem que utiliza o acompanhamento do status hídrico do solo torna a decisão de irrigar mais eficiente, pois se relaciona à disponibilidade hídrica às plantas e pode ser sustentada em medições realizadas em tempo real (MONTESANO; VAN IERSEL; PARENTE, 2016). Atualmente, existem diversos controladores de irrigação no mercado que regulam o conteúdo de água no solo a partir de medições realizadas por sensores. Estes controladores permitem acionar a irrigação quando os sensores detectam valores abaixo de um valor pré-definido como limite inferior de umidade do solo e irrigam até a detecção de um valor definido como limite superior de umidade. Geralmente, a referência de umidade do solo destes controladores é estabelecida tendo como referência a umidade do solo na capacidade de campo (ROMERO *et al.*, 2012).

Recentemente, avanços no campo dos componentes de hardware de código aberto, como a plataforma de prototipagem eletrônica Arduino, introduziram novos dispositivos de medição da umidade do solo que podem ser interligados a sistemas de armazenamento, transmissão de dados e automação (BITELLA *et al.*, 2014). O

microcontrolador Arduino executa um programa de código aberto que é capaz de operacionalizar componentes eletrônicos em um circuito elétrico. Atualmente, no contexto da eletrônica de código aberto, existe uma grande variedade de sensores e componentes auxiliares, como módulos de armazenamento de dados e de comunicação, que podem ser aplicados a sistemas de automação e monitoramento de variáveis ligadas à sistemas de produção irrigada (MASSERONI *et al.*, 2016; TARGA; SILVA; CEZAR, 2019). O controle da automação de irrigação tendo como referência o monitoramento do potencial matricial do solo com eletrônica de baixo custo, pode ser uma alternativa viável para a inserção da tecnologia à produção comercial de hortaliças (VALENÇA *et al.*, 2018). Tensiômetros eletrônicos acoplados na plataforma Arduino utilizam como mecanismo de leitura transdutores de pressão, que integrados a um circuito de controle, possibilitam a automação da irrigação a partir da leitura direta do potencial matricial do solo (PEREIRA *et al.*, 2020).

Diante do exposto, o presente trabalho avalia as respostas da cultura da alface cultivada em vasos de cultivo, submetida a diferentes potenciais matriciais críticos de reposição hídrica em um sistema de automação de irrigação controlado pelo microcontrolador Arduino, integrado a tensiômetros eletrônicos.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Local do experimento

O estudo foi conduzido em casa de vegetação na Estação Experimental de Biologia da Universidade de Brasília (UnB), situada nas coordenadas 15°44'08,7" S e 47°52'58,2" O. O clima da região, segundo Köppen-Geiger, é do tipo Aw, caracterizado

como tropical, com estação seca no inverno, precipitação total média anual de 1360 mm, temperatura máxima média anual de 26,7°C e mínima média anual de 16,1°C (CARDOSO; MARCUZZO; BARROS, 2014). A casa de vegetação possui dimensões de 30 m de comprimento e 13 m de largura, com sistema de arrefecimento evaporativo do ar, composto por um painel de argila expandida, associado a um conjunto motobomba responsável pelo recalque de água à parte superior do painel e 8 exaustores com capacidade de remoção de 450 m³ ar min⁻¹. O controle de acionamento do sistema de arrefecimento utilizou a temperatura do ar interno, ajustado por um termostato em 27°C, instalado na parte central da casa de vegetação a 2 m de altura em relação ao solo. Na altura do pé direito foi instalado um sombrite com 50% de luminosidade.

4.2 Caracterização físico-hídrica e química do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Neossolo Regolítico (NR) e preparo dos vasos de cultivo.

Para o cultivo das plantas de alface (*Lactuca sativa* L.), cv. Wanda, foram utilizados vasos de 11 L, preenchidos com Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) de textura argilosa coletado na camada de 0 a 0,20 m em área de cultivos anuais (15°56'56,32" S; 47°55'46,16" O) e com Neossolo Regolítico (NR) de textura arenosa coletado na camada de 0 a 0,20 m em área de Cerrado natural (15°58'48,27" S; 47°56'57,54" O). Amostras indeformadas de solo foram utilizadas para determinação das propriedades físicas (Tabela 1). Ambos os solos foram peneirados em malha #2,0 mm e secos ao ar livre. Após a secagem, coletaram-se cinco amostras simples de cada tipo de solo para determinação de suas propriedades químicas e granulométricas (Tabela 2).

Tabela 1. Características físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Noeossolo Regolítico (NR).

Características	LVA	NR
Densidade aparente do solo (g cm ⁻³)	0,962	1,292
Porosidade total (m ³ m ⁻³)	0,636	0,512
Macroporosidade (m ³ m ⁻³)	0,144	0,200
Microporosidade (m ³ m ⁻³)	0,492	0,312

Fonte: Autores (2020)

Tabela 2. Atributos químicos e granulometria do solo na camada de 0-0,20 m do Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA) e Noeossolo Regolítico (NR).

Características	LVA	NR	Características	LVA	NR
pH em CaCl ₂	5,6	4,2	H + Al (cmolc dm ⁻³)	3,7	5,5
P (mg dm ⁻³)	7,8	4,1	SB (cmolc dm ⁻³)	4,7	1,0
K (mg dm ⁻³)	62	45	t (cmolc dm ⁻³)	4,7	1,7
Ca ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	3,5	0,6	T (cmolc dm ⁻³)	8,4	6,6
Mg ²⁺ (cmolc dm ⁻³)	1,0	0,2	V (%)	56,4	15,9
Al ³⁺ (cmolc dm ⁻³)	0,01	0,68	m (%)	0,2	39,3
Areia	4,1%	77,2%			
Silte	36,7%	8,5%			
Argila	59,2%	14,3%			

t = CTC efetiva, T = CTC a pH = 7,0, m = saturação por alumínio, V = saturação por bases, SB = soma de bases trocáveis. Fonte: Autores (2020)

Foram utilizados 64 vasos de cultivo com volume útil de 0,073 m³ preenchidos com 6 kg de LVA e 64 vasos com 7 kg de NR. Na base interna de cada vaso foi colocada uma manta sintética não tecida e sobre esta foi adicionada uma camada de 0,02 m de brita #2,0 para auxiliar a drenagem. As mudas de alface foram produzidas em bandejas de poliestireno expandido de 200 células, preenchidas com substrato comercial composto de fibra de coco e vermiculita. O transplante de uma muda por vaso foi realizado no momento em que as mudas apresentaram, em média, 5 folhas definitivas.

O delineamento experimental foi o em blocos completos casualizados com quatro repetições. Cada parcela experimental foi composta de quatro vasos de cultivo com espaçamento entre linhas de 1,0 m e espaçamento entre plantas de 0,4 m. Ainda, foram implantados 52 vasos de bordadura na área, resultando em um total de 180 vasos de cultivo. A adubação foi realizada manualmente a lanço (Tabela 3), convertendo a quantidade recomendada, em kg ha⁻¹, para g vaso⁻¹, considerando a área da seção de cada vaso (530 cm²), a análise de fertilidade (Tabela 2) e as dosagens de acordo com a recomendação proposta por Ribeiro, Guimarães e Alvares (1999).

Tabela 3. Adubação realizada nos vasos preenchidos com LVA e NR.

Nutriente	Recomendação (kg ha ⁻¹)		Quantidade total por vaso (g)		Plantio	1 ^a aplicação	2 ^a aplicação	3 ^a aplicação
	LVA	NR	LVA	NR				
N	150	150	21,2	21,2	20%	20%	30%	30%
P ₂ O ₅	300	400	92,9	123,8	100%	-	-	-
K ₂ O	90	120	9,6	13,0	20%	20%	30%	30%

Fonte: Autores (2020)

Antes do transplântio das mudas para os vasos foi efetuada a aplicação de 25 mm de água distribuída em 3 aplicações, suficiente para a drenagem da água pelo fundo dos vasos e acomodação do solo em seu interior, em seguida foram retiradas amostras indeformadas para elaboração da curva característica de retenção de água no solo pelo método da câmara de pressão de Richards. As equações de retenção de água

do LVA e NR foram ajustadas a partir do modelo proposto por Van Genuchten (1980), utilizando a restrição de Mualem e o software RETC (VAN GENUCHTEN; LEIJ; YATES, 1991), bem como a umidade dos solos na capacidade de campo (Θ_{cc}) nos potenciais de - 10 kPa para o LVA e - 5 kPa para o NR e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) no potencial de - 1500 kPa para ambos os solos (Tabela 4).

Tabela 4. Equações ajustadas das curvas de retenção de água no solo conforme Van Genuchten, umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}) e ponto de murcha permanente (Θ_{pmp}) para o LVA e NR.

Tipo de solo	Equação ajustada	R ²	Θ_{cc} (cm ³ cm ⁻³)	Θ_{pmp} (cm ³ cm ⁻³)
LVA	$\theta = 0,159 + 0,674/[1+(0,178h)^{1,23}]^{0,18}$	0,99**	0,55	0,23
NR	$\theta = 0,113 + 0,445/[1+(0,069h)^{1,89}]^{0,47}$	0,98**	0,40	0,11

Θ : umidade volumétrica (cm³ cm⁻³); h: Potencial matricial (kPa); Θ_{cc} : Umidade na capacidade de campo em base volume (cm³ cm⁻³); Θ_{pmp} : umidade do solo no ponto de murcha permanente em base volume (cm³ cm⁻³);

**Significativo a $p < 0,05$. Fonte: Autores (2020)

4.3 Sistema de irrigação

Foi utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com emissores do tipo on-line, instalados em tubos de PEBD de 16 mm de diâmetro externo, sendo um emissor por vaso de cultivo e com vazão de 4,0 L h⁻¹ na pressão de serviço de 10 m.c.a. mantida por um regulador de pressão. Utilizou-se um filtro de discos de 125 micron, tomadas de pressão instaladas após as válvulas solenoides, manômetro de Bourdon com glicerina com precisão de 0,1 kgf cm⁻², registros de esfera, conexões hidráulicas e um reservatório com capacidade de 1000 L. No início do experimento foi medida a vazão de 16 gotejadores com 3 repetições, por

tempo de coleta de 2 minutos, determinando-se o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), o qual foi de 97,06%.

4.4 Sistema de automação e monitoramento de variáveis micrometeorológicas

O monitoramento do potencial matricial do solo foi realizado por tensiômetros eletrônicos acoplados a transdutores de pressão modelo MPX5700DP, os quais convertiam o vácuo parcial do interior do tensiômetro em sinal elétrico e o transmitiam para a placa microcontroladora Arduino. A placa Arduino MEGA 2560 integrava os

tensiômetros com outros componentes do sistema, sendo o módulo RTC (*Real Time Clock*), módulo SD-Card (*Data Logger*), módulos relés, válvulas solenoides de ½” e motobomba monofásica de 1/3 cv. Cada módulo relé possui 4 canais, assim, utilizou-se dois módulos relés para o acionamento de oito válvulas solenoides e um relé adicional de 1 canal para o acionamento da motobomba. Para a conexão dos transdutores de pressão, foram utilizadas

oito portas analógicas da placa Arduino. Para a alimentação de energia elétrica da placa Arduino foi utilizada uma fonte DC de 7,5 V e para os transdutores de pressão e módulos relés, utilizou-se uma fonte DC de 5 V. Todas as fontes foram conectadas em um filtro de linha ligado à rede convencional de energia, a qual opera na tensão de 220 V. A Figura 1A apresenta a disposição dos vasos com os tensiômetros e a Figura 1B um tensiômetro eletrônico.

Figura 1. Disposição geral dos vasos e tensiômetros eletrônicos (A); detalhe do tensiômetro eletrônico instalado no vaso (B).



Fonte: Autores (2020)

Para a programação da automação de irrigação foi desenvolvido um código de programação contendo um código principal e sub-rotinas para execução dos seguintes procedimentos: i) medição do potencial matricial fornecido em cada leitura com sua respectiva data e horário de aquisição; ii) armazenamento das leituras em arquivo *.txt* em intervalo de 60 s; iii) comparação dos valores lidos de potencial matricial com valores críticos definidos pelo usuário, para que o sistema atuasse no acionamento da

motobomba e abertura e fechamento de válvulas solenoides. Os Potenciais Matriciais críticos (PMc) foram obtidos a partir das curvas características de retenção de água de cada solo, onde, a partir dos valores na capacidade de campo de -10 kPa para o LVA e -5 kPa para o NR, adotou-se os valores de PMc de -15, -20, -25 e -30 kPa para o LVA, denominados como LVA/-15 kPa, LVA/-20 kPa, LVA/-25 kPa e LVA/-30 kPa, respectivamente e de -10, -15, -20 e -25 kPa para o NR, denominados NR/-10 kPa ,

NR/-15 kPa, NR/-20 kPa e NR/-25 kPa , respectivamente. Para o término de um determinado turno de irrigação, especificou-se o tempo necessário para o restabelecimento da umidade na capacidade de campo em cada solo, utilizando a Equação 1, indicada para a irrigação localizada com uso de tensiometria, adaptado de Braga e Calgaro, (2010).

$$T_i = \frac{L_b \cdot D_m}{n \cdot Q} \quad (1)$$

Em que, T_i = tempo de irrigação (min); L_b = lâmina bruta de aplicação (mm); D_m = diâmetro molhado pelo gotejador (0,057 m); n = número de gotejadores por vaso (1); Q = vazão do gotejador (0,066 L min^{-1}).

A temperatura e a umidade relativa do ar foram obtidas por meio do sensor conjugado DHT-22, integrado a uma placa Arduino UNO. O sensor possui capacidade de leitura da umidade relativa do ar entre 0 e 100% e temperatura do ar entre -40 e 125°C, com leituras a cada 60 s e armazenamento dos dados em arquivo de texto pelo módulo SD-Card (*Data Logger*), para tanto, o mesmo foi instalado na parte central do experimento a 1,0 m de altura do solo.

4.5 Parâmetros fenométricos da alfaca, eficiência do uso da água e índice Falker de clorofila total

Aos 33 Dias Após o Transplântio (DAT) foi determinado o Número de Folhas (NF), Altura do Caule (AC), Diâmetro do Caule (DC), Massa Fresca da Parte Aérea (MFPA), Massa Fresca de Raízes (MFR), Massa Seca da Parte Aérea (MSPA) e Massa Seca de Raízes (MSR), índice Falker de Clorofila a (CLA), Clorofila b (CLB), Clorofila total (CLT) e a Eficiência do Uso da Água (EUA). Para todas as variáveis obtidas foram consideradas quatro plantas úteis por repetição, totalizando 16 plantas

por tratamento. Na contagem do NF consideraram-se apenas as folhas expandidas, com comprimento mínimo de 5 cm, cor verde típica da cultivar, desprezando-se as folhas secas rentes ao solo (VIANA *et al.*, 2004) e aquelas cujo limbo foliar estava danificado em mais de 50%, por injúrias diversas. A AC foi definida após a retirada das folhas mensurando-se a distância entre o colo da planta e a inserção da bainha da primeira folha (mais nova), com paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm. O DC foi medido na região do colo da planta, após a retirada de todas as folhas, com as leituras em mm, realizadas com o auxílio do paquímetro, a MFPA foi obtida pesando-se as folhas e caule, a MFR foi obtida pesando-se a raiz seccionada a partir do colo de cada planta. Posteriormente, a MSPA e MSR foram obtidas por pesagem após secagem das folhas caules e raízes em estufa de circulação forçada a 65°C durante 72 horas. Ambas as medições de massa fresca e massa seca foram realizadas em balança de precisão com precisão de 0,01 g.

A determinação indireta dos valores de clorofila foi realizada utilizando-se um clorofilômetro, marca ClorofiLOG® modelo CFL 1030. A partir dos resultados do índice de Clorofila a (CLA), Clorofila b (CLB) e Total (CLT) foram ajustados modelos de regressão linear para descrever a relação entre os potenciais críticos e o índice de clorofila médio obtido em cada tratamento de reposição hídrica. A Eficiência do Uso da Água (EUA) foi obtida considerando a MFPA e a lâmina total de irrigação (mm) aplicada por tratamento a partir da relação MFPA/lâmina total.

Os resultados foram submetidos à análise de variância pelo teste 'F', onde, nos casos de significância, realizou-se o teste Tukey de comparação de médias para as variáveis fenométricas das plantas e análise de regressão para o índice de clorofila, ambos, ao nível de significância $p < 0,05$. Adicionalmente, os dados de fenométricos foram submetidos à análise de componentes

principais. Para as análises estatísticas utilizou-se o software RStudio v. 1.3.1073.

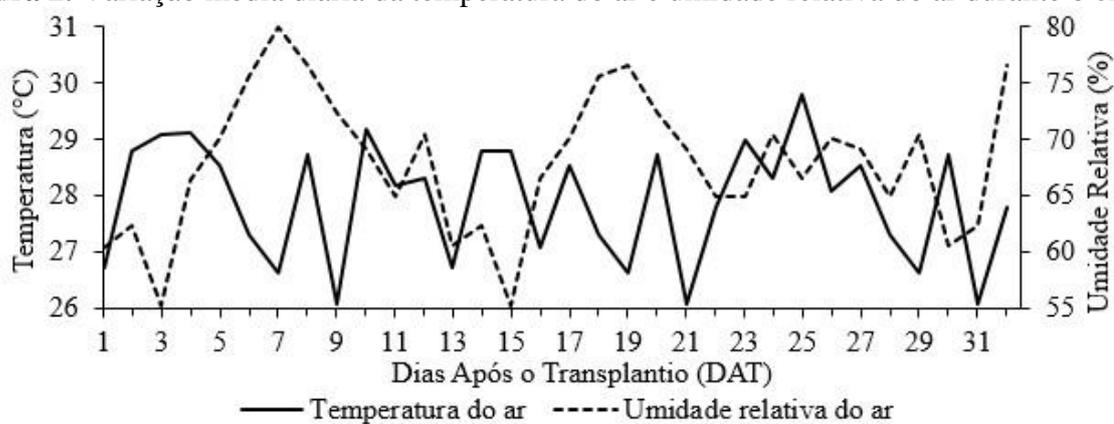
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Sistema de automação da irrigação e variáveis micrometeorológicas

Os valores médios de temperatura do ar e umidade relativa do ar durante o ciclo da

cultura foram de 27,9°C e 68%, respectivamente (Figura 2). A temperatura máxima tolerável da alface é de cerca de 30°C para a maioria das cultivares (DIAMANTE et al., 2013). Os dados são semelhantes aos observados por Villas Boas et al. (2008), os quais registraram em casa de vegetação, valores médios de 25°C e 66,5% para temperatura do ar e umidade relativa do ar, respectivamente.

Figura 2. Variação média diária da temperatura do ar e umidade relativa do ar durante o ciclo

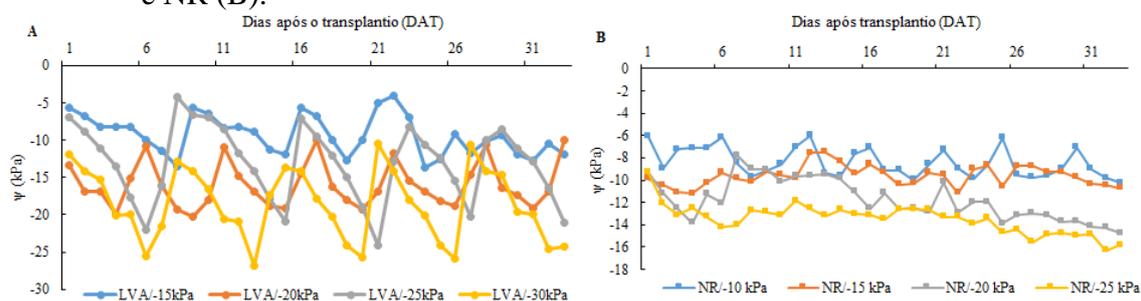


Fonte: Autores (2020)

Observa-se que cada PMc apresenta uma dinâmica temporal distinta, em que, o LVA/-15 kPa (Figura 3A), manteve os valores próximos a -10 kPa com algumas ocorrências de valores médios diários próximos a -5 kPa, o que indica umidade excessiva no solo nesses dias, uma vez que o potencial na capacidade de campo para o LVA é de -10 kPa. O PMc LVA/-20 kPa apresentou variações entre -10 e -20 kPa ao longo do ciclo da alface. Os PMc's LVA/-25 e LVA/-30 kPa mantiveram os valores médios diários acima dos valores críticos adotados para o acionamento, entretanto, o LVA/-30 kPa apresentou valores médios abaixo de -15 kPa durante a maior parte do tempo, indicando assim, manutenção da umidade abaixo da capacidade de campo.

No NR (Figura 3B) observa-se que o PMc NR/-10 kPa manteve os valores médios entre -6 e -10 kPa durante o ciclo da alface. O potencial matricial (PM) na capacidade de campo para o NR foi de -5 kPa, e, ao se observar a variação média dos demais PMc's verifica-se que os valores médios diários não atingiram este valor ao longo do ciclo. A maior frequência de irrigação no PMc de -10/kPa (Tabela 9) foi determinante para a manutenção do PM médio diário mais próximo à capacidade de campo estabelecida. O PMc NR/-25 kPa manteve os valores médios diários de potencial abaixo de -10 kPa, indicando a manutenção da umidade do solo em valores abaixo da capacidade de campo ao longo do ciclo da alface para esse PMc.

Figura 3. Variação média diária do potencial matricial ao longo do ciclo da alface em LVA (A) e NR (B).



Fonte: Autores (2020)

A performance do controle de irrigação via potencial matricial é considerada satisfatória quando se verifica a manutenção dos potenciais em valores próximos aos limites adotados para acionamento e interrupção da irrigação, considerando uma tolerância máxima de 20% (ALMEIDA *et al.*, 2017). A partir desse critério, verifica-se que os potenciais em LVA e NR permaneceram dentro dos limites aceitáveis ao longo do ciclo da cultura (Figura 3), entretanto, em NR, ocorreu uma maior variação na leitura dos potenciais no momento de acionamento e principalmente, após o término da irrigação, sendo esta variação, acima de 20% no NR/-

10 kPa (Tabela 5). Solos que drenam a água mais rapidamente, são geralmente, aqueles que possuem maior macroporosidade, já aqueles que drenam mais lentamente, são solos em que os microporos constituem a maior parte da porosidade total. Assim, como é bem conhecido, um solo arenoso conduz a água mais rapidamente do que um solo argiloso (HILLEL, 1998). Sendo assim, a maior variação dos potenciais no NR pode ter sido influenciada por essa característica do solo, o qual possui macroporosidade de 20% e porcentagem de areia de 77% enquanto o LVA, possui 14 % de macroporosidade e 4% de areia (Tabela 1).

Tabela 5. Potenciais Matriciais médios de Acionamento da irrigação (P_{Ma}), potenciais matriciais médios de interrupção da irrigação (P_{Mi}), desvio padrão (SD) e coeficiente de variação (CV) para os potenciais matriciais críticos (P_{Mc}) no LVA e NR.

Tipo de solo	P _{Mc} (kPa)	P _{Ma} (kPa)	CV (%)	SD (kPa)	P _{Mi} (kPa)	CV (%)	SD (kPa)
LVA	-15	15,52	2,77	0,42	5,81	3,88	0,24
	-20	21,95	0,87	0,16	12,40	2,34	0,30
	-25	25,46	0,89	0,22	10,19	7,52	0,76
	-30	31,08	1,27	0,37	9,34	8,36	0,78
NR	-10	10,51	4,34	0,45	4,52	25,73	1,16
	-15	15,78	3,41	0,53	5,40	11,64	0,62
	-20	20,62	2,02	0,41	4,93	13,58	0,67
	-25	25,66	2,11	0,54	4,88	11,43	0,55

LVA: Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e NR: Neosolo Regolítico. Fonte: Autores (2020)

Em parte, a variação nas leituras dos P_{Mc}'s também pode estar relacionada ao sinal elétrico transmitido pelo transdutor de

pressão conectado no tensiômetro. Cada ciclo de secagem e umedecimento do solo altera o volume de ar no interior do

tensiômetro, o que pode causar pequenas variações no sinal elétrico de saída do transdutor de pressão (AZEVEDO, 2017). Considerando a Capacidade de água disponível (CAD) como o intervalo de umidade do solo entre o ponto de murcha permanente (-1500 kPa) e a capacidade de campo (-10 kPa para o LVA e -5 kPa para o NR), o sistema de automação em LVA atuou no controle de 13, 21, 27 e 32% da CAD nos PMc's LVA/-15, LVA/-20, LVA/-25 e LVA/-30 kPa, respectivamente e no NR controlou 46, 62, 76 e 77% da CAD nos PMc's NR/-10, NR/-15, NR/-20 e NR/-25 kPa, respectivamente.

Geralmente, os tensiômetros possuem capacidade de leitura de potencial matricial de até -100 kPa, abaixo do qual o equipamento perde a escorva e deixa de registrar os potenciais matriciais adequadamente (BIANCHI *et al.*, 2017). Até o potencial de -100 kPa, é possível monitorar cerca de 70% da capacidade de água disponível (CAD) em solo de textura arenosa, já em solo de textura argilosa, até 40% da CAD pode ser monitorada (BRAGA; CALGARO, 2010). Além disso, a boa performance do controlador depende da manutenção adequada e da correta instalação do tensiômetro para garantir o melhor contato possível entre a cápsula porosa e o solo. As manutenções, que consistem principalmente no reabastecimento do tensiômetro com água se mostraram mais frequentes nos PMc's em NR, principalmente nos potenciais abaixo de -15 kPa no NR.

5.2 Parâmetros fenométricos da alface

Na análise fenométrica da alface observa-se que os Coeficientes de Variação (CV) variaram entre 14,34 e 54,24%, sendo as maiores variações para a MFPA e MFR (Tabela 6), os quais estão diretamente relacionadas com a produção de fitomassa fresca. Ao aplicar a diferença entre a MFPA e MSPA, verifica-se que o percentual médio

de água na alface nos PMc's em LVA foi de 91,2% e em NR foi de 92,1%. A alface possui em média, 94% de água em sua constituição, assim, parte da variabilidade da cultura ocorre devido a variações do teor de água de uma planta para outra, resultando em um maior CV na MFPA (GUIMARÃES *et al.*, 2019).

O PMc NR/-25 kPa apresentou os menores valores na maioria das variáveis fenométricas avaliadas (Tabela 6). A maior redução fenométrica no NR/-25kPa foi observada para MFPA, onde, em relação ao NR/-10kPa a MFPA foi 67% inferior e em relação ao LVA/-30 kPa a redução foi de 29%. A diferença de umidade entre os PMc's NR/-25kPa e NR/-10kPa é de aproximadamente 10% e a frequência de irrigação no NR/-25kPa foi 60% inferior em relação ao NR/-10kPa (Tabela 7). Os resultados de MFPA no NR/-10 kPa seguem tendência ao que foi observado por Geisenhoff *et al.* (2016), em que a maior produtividade da alface crespa em cultivo protegido foi obtida quando a irrigação era realizada em potenciais críticos próximos a -12 kPa.

A redução no NF em função do PMc foi significativa no NR a partir do NR/-15 kPa, enquanto no LVA, o NF não apresentou diferenças significativas entre os PMc's avaliados. Os maiores valores de DP ocorreram no NR/-10 kPa e não diferenciaram nos PMc's em LVA. As reduções do DP no NR foram de 6,1, 5,3, e 9,1 cm para os PMc's NR/-15, NR/-20 e NR/-25 kPa, respectivamente (Tabela 6). Com base nesses resultados em NR, a redução média do DP foi de 0,04 cm por unidade de incremento do PMc adotado. Resultado inferior ao observado por Geisenhoff *et al.* (2016), onde, ao utilizarem PMc entre -12 e -70 kPa em solo de textura média, verificaram a redução de 0,08 cm no (DP) por unidade de incremento no potencial crítico de irrigação adotado.

Os PMc's entre -15 e -30 kPa não alteraram significativamente as repostas

fenométricas da cultura da alface para o LVA. Bianchi *et al.* (2017) relatam alta variabilidade dos PMc's na cultura da alface, os quais dependem de fatores como, espécies e variedades, textura do solo, sistema de irrigação, tipo de dispositivo de monitoramento do potencial matricial e profundidade de instalação do tensiômetro.

Em geral, para a cultura da alface, considerando tensiômetros instalados até a profundidade de 0,15 m em solos de textura arenosa e irrigação por gotejamento, os PMc's ideais podem chegar até -20 kPa. Já para solos de textura argilosa, sob o mesmo sistema de irrigação, os autores reportam PMc's ideais de até -30 kPa.

Tabela 6. Número de folhas (NF), diâmetro do caule (DC), altura de caule (AC) e diâmetro de planta (DP), massa fresca da parte aérea (MFPA), massa fresca de raízes (MFR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca de raízes (MSR) para os potenciais matriciais críticos (PMc) em LVA e NR.

Tipo de solo		Variáveis							
LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR	LVA	NR
PMc	PMc	NF		DC (mm)		AC (mm)		DP (cm)	
-15	-10	9 aA	12 bB	7,7 aA	9,8 aB	38,9 aA	59,6 aB	26,4 aA	32,4 bB
-20	-15	9 aA	9 aA	8,1 aA	7,9 aA	42,3 aA	42,3 bA	27,3 aA	26,3 aA
-25	-20	9 aA	9 aA	7,3 aA	8,5 aA	45,3 aA	50,2 aB	26,1 aA	27,1 aA
-30	-25	9 aA	8 aA	7,6 aA	7,7 aA	38,4 aA	36,9 bA	25,2 aA	22,3 aA
CV (%)		16,63		18,99		18,16		14,34	
		MFPA (g)		MFR (g)		MSPA (g)		MSR (g)	
-15	-10	37,7 aA	79,7 bB	6,1 aA	7,8 aA	3,4 aA	5,0 aA	1,3 aA	1,0 aA
-20	-15	42,9 aA	37,7 aA	2,7 bA	2,7 bA	3,7 aA	3,6 abA	0,4 bA	0,4 aA
-25	-20	38,2 aA	41,1 aA	3,9 abA	2,8 bA	3,2 aA	3,3 abA	0,6 abA	0,3 bA
-30	-25	36,9 aA	26,1 aB	5,3 abA	1,2 bB	3,3 aA	2,7 bA	1,0 abA	0,2 bA
CV (%)		54,24		31,78		18,00		21,04	

Letras minúsculas diferentes na coluna e maiúsculas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte: Autores (2020)

5.3 Eficiência do uso da água (EUA)

No LVA/-25 kPa aplicou-se uma lâmina total de irrigação de 40,7 mm desde o transplântio até 33 DAT, o que resultou em uma EUA de $1,06 \text{ g mm}^{-1}$ (Tabela 7), já no LVA/-15 kPa foi aplicado 28,8 mm, resultando em uma EUA de $1,31 \text{ g mm}^{-1}$. Por sua vez, no LVA/-30 kPa aplicou-se 47,1 mm, em 5 eventos de irrigação durante o ciclo da alface, equivalendo a EUA de $1,27 \text{ g mm}^{-1}$. Apesar da frequência de irrigações no LVA/-15 kPa ter sido levemente superior em relação ao LVA/-30kPa, a lâmina total aplicada foi 38,8% inferior. Isso se deve ao fato da umidade no PMc LVA/-15 kPa ser de 52,8% e no LVA/-30 era de 47%, o que corresponde a uma lâmina de 2,9 mm e 7,8 mm, por evento de irrigação,

respectivamente. De maneira geral, as lâminas totais de irrigação e o número de irrigações foram maiores no NR em relação ao LVA em todos os PMc's avaliados (Tabela 7).

A maior lâmina total (177,5 mm) foi aplicada no NR/-10 kPa (Tabela 7), o qual obteve a maior produção de MFPA entre os PMc's avaliados (Tabela 6). Valeriano et al. (2016) observaram o maior peso comercial de plantas de alface a partir da aplicação de lâminas entre 116 e 118 mm ciclo⁻¹ em solo de textura franco arenosa, acima desta lâmina, não foi possível observar ganhos significativos em produção de matéria fresca. Por sua vez, Cardoso e Klar (2011) observaram maior acúmulo de matéria fresca da parte aérea com a aplicação de uma

lâmina de 114 mm ciclo⁻¹, no PMc de -20 kPa em solo de textura arenosa.

O número total de irrigações em NR se mostrou dependente do PMc, em que o redução de -10 para -15 kPa reduziu significativamente a frequência de irrigação em NR. A maior lâmina aplicada nos PMc's em NR, influenciou sobretudo, a EUA com valores abaixo de 1,0 g mm⁻¹ em todos os PMc's avaliados. Verifica-se que o PMc no NR/-10 kPa obteve maior EUA em NR, com a aplicação de lâmina total de 177,5 mm distribuídos em 15 eventos de irrigação, enquanto NR/-25 kPa resultou na menor EUA no NR com a aplicação de uma lâmina total de 140,0 mm (Tabela 7). Bandeira *et al.* (2011) afirmam que a distribuição de água e a manutenção de níveis ótimos de umidade no solo durante todo o ciclo da cultura

reduzem as perdas por drenagem e os períodos de estresse hídrico, aumentando assim a EUA.

Apesar da EUA no NR ter sido inferior ao LVA, a MFPA no NR/-10 kPa foi maior dentre todos os PMc's avaliados, com valor médio de 79,7 g planta⁻¹ (Tabela 7). A maior EUA não representa, necessariamente, aumento da produção de massa fresca, como observado por Valeriano *et al.* (2016), onde a aplicação de 60% da evapotranspiração da cultura (ETc) em alface americana cultivada em ambiente protegido, resultou em EUA de 1,8 g mm⁻¹ e peso comercial da cabeça de 120 g planta⁻¹. Por outro lado, foi observado que a aplicação de 95,73% da ETc, resultou em EUA de 1,2 g mm⁻¹ e peso comercial da cabeça de 175,4 g planta⁻¹.

Tabela 7. Potenciais críticos de reposição hídrica (PMc), umidade na capacidade de campo (Θ_{cc}), umidade no potencial crítico (Θ_{pc}), lâmina aplicada por evento de irrigação (LI), lâmina de irrigação aplicada antes (Inicial) e após diferenciação dos tratamentos (Irrigação), lâmina total aplicada (Total), número total de irrigações (NI) e eficiência do uso da água (EUA) em alface cultivada em embalagens preenchidas com LVA e NR em ambiente protegido.

Tipo de solo	PMc (kPa)	Θ_{cc} (%)	Θ_{pc} (%)	LI (mm)	Lâminas (mm)		Total	NI	EUA (g mm ⁻¹)
					Inicial	Irrigação			
LVA	-15	55,6	52,8	2,9	8	20,8	28,8	7	1,31
	-20	55,6	50,7	4,9	8	29,7	37,7	6	1,13
	-25	55,6	49,0	6,5	8	32,7	40,7	5	1,06
	-30	55,6	47,0	7,8	8	39,1	47,1	5	1,27
NR	-10	40,4	29,8	10,8	15	162,5	177,5	15	0,44
	-15	40,4	24,7	16,0	15	128,2	143,2	8	0,26
	-20	40,4	21,8	18,9	15	170,6	185,6	9	0,22
	-25	40,4	20,0	20,8	15	125,0	140,0	6	0,18

5.4 Índice de clorofila

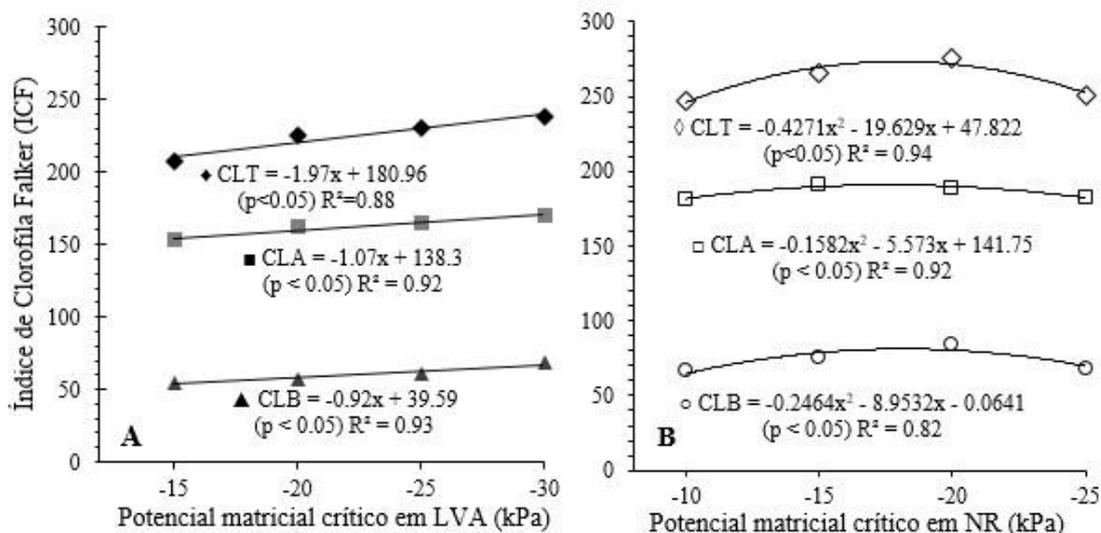
Os índices Falker de clorofila apresentaram aumento linear em função dos potenciais críticos utilizados no LVA (Figura 4A), enquanto que no NR (Figura 4B), os índices apresentaram respostas quadráticas, indicando, um ponto de maximização dos teores de clorofila em NR. Valença *et al.* (2018) verificaram um aumento linear da clorofila total com a

redução do volume de água aplicado em alface cultivado em vasos, o que ocorreu devido ao aumento da concentração da clorofila em função da menor quantidade de folhas observadas nos tratamentos de menor reposição hídrica. Comportamento semelhante foi observado nos PMc's em NR (Tabela 6), em que o NF reduziu significativamente com o aumento do PMc de -10 para -15kPa. Já para o LVA, o aumento linear do teor de clorofila não

alterou significativamente o NF, uma vez que os valores de NF se mantiveram

constantes entre os PMc's de -15 e -30 kPa (Tabela 6).

Figura 4. Índices Falker de clorofila a (CLA), clorofila b (CLB) e clorofila total (CLT) para o LVA (A) e NR (B), em função dos potenciais críticos de reposição hídrica em alface cultivada em ambiente protegido.



Fonte: Autores (2020)

5.5 Análise de componentes principais (PCA)

A análise de PCA é uma técnica estatística de análise multivariada que transforma linearmente um conjunto original de variáveis, inicialmente correlacionadas entre si, num conjunto substancialmente menor de variáveis não correlacionadas que contém a maior parte da informação do conjunto de dados original (HONGYU, 2015).

Na análise de componentes principais, observou-se que as três primeiras componentes responderam por mais de 80% da variância acumulada (Tabela 8), sendo que as duas primeiras componentes foram responsáveis por 72,81% da variância explicada. As variáveis com maiores participações na primeira componente, a qual respondeu por 55,69% da variação total foram MFPA, MSPA e NF. Na segunda componente principal, que respondeu por 17,11% da variância total, as variáveis de maior peso foram MSR e MFR.

Na representação gráfica da PCA (Figura 5), verifica-se que praticamente todas as variáveis são responsáveis pela discriminação do grupo NR/-10 kPa, enquanto as variáveis MSR e MFR são mais responsáveis pela discriminação dos grupos LVA/-15 e LVA/-30 kPa. Assim, os três grupos se mostram semelhantes em relação à produção de raízes, entretanto, o grupo NR/-10 kPa é caracterizado por plantas com maior desenvolvimento da parte aérea, com maior produção de MFPA, MSPA, NF e maiores valores de AC, DC, AP e DP, enquanto os grupos LVA/-15 e LVA/-30 kPa caracterizam-se por plantas de porte menor, mas com maior desenvolvimento de raízes devido a maior produção de MFR e MSR. Soundy *et al.* (2005) avaliaram o efeito da irrigação em déficit com reposição até a capacidade de campo em alface, os autores observaram que o acúmulo de massa de raízes foi semelhante entre os tratamentos, e que a aplicação da irrigação em déficit afeta de forma mais efetiva o acúmulo de peso na parte aérea em relação ao sistema radicular.

Os autores afirmam que em condição de déficit hídrico moderado é provável que as raízes apresentem um maior desenvolvimento lateral e em profundidade

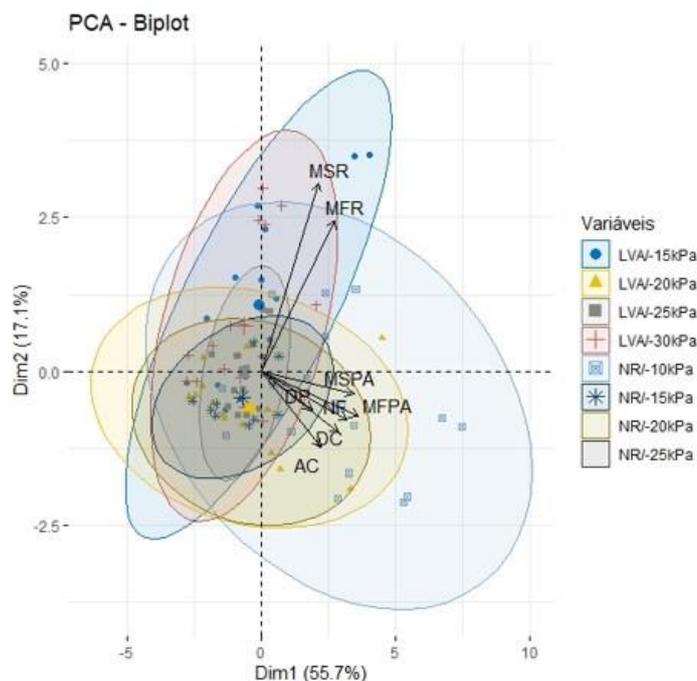
para acessar a água em profundidade em resposta à secagem na parte mais superior do solo.

Tabela 8. Análise de componentes principais dos parâmetros fenométricos da alface em todos os PMc's avaliados em LVA e NR.

Componentes da variância	Componentes principais				
	1	2	3	4	5
Autovalores	4,45	1,36	0,81	0,69	0,38
Variância total explicada (%)	55,69	17,11	10,16	8,72	4,80
Variância acumulada (%)	55,69	72,81	82,98	91,70	96,51
Variáveis	Correlação com os componentes principais				
NF	0,84	-0,20	-0,18	-0,14	-0,34
MFR	0,72	0,64	0,08	0,14	0,06
DC	0,75	-0,26	-0,27	-0,17	0,48
AC	0,58	-0,32	0,22	0,69	0,03
MFPA	0,95	-0,19	-0,05	0,03	-0,03
MSR	0,56	0,81	0,01	-0,01	0,01
MSPA	0,91	-0,09	-0,17	-0,12	-0,15
DP	0,49	-0,16	0,78	-0,34	0,03

Fonte: Autores (2020)

Figura 5. Dispersão (gráfico *biplot*) dos PMc's em LVA e NR. MSPA: Massa seca da parte aérea; MFPA: Massa fresca da parte aérea; DP: Diâmetro de plantas; NF: Número de folhas; DC: Diâmetro de caule; AC: Altura de caule; MSR: Massa seca de raízes; MFR: Massa fresca de raízes.



Fonte: Autores (2020)

6 CONCLUSÕES

O uso de tensiômetros eletrônicos integrados a uma placa microcontroladora Arduino foi capaz de monitorar, armazenar os dados de potencial matricial, acionar e interromper a irrigação em todos os potenciais matriciais críticos avaliados em Latossolo Vermelho Amarelo e Neosolo Regolítico. A frequência de irrigação no potencial matricial crítico de -10 kPa em Neosolo Regolítico apresentou a maior variação nos potenciais matriciais ao final de cada evento de irrigação.

Para potencial matricial crítico abaixo de -15 kPa em Neosolo Regolítico a frequência de irrigação foi reduzida substancialmente, nessa condição, o déficit hídrico prejudicou o crescimento da alface cultivada em vasos. A maior eficiência do uso da água da alface ocorreu no Latossolo Vermelho Amarelo no potencial matricial de -15 kPa. Entretanto, apesar de ter uma menor EUA, a maior produção de massa fresca da parte aérea ocorreu no Neosolo Regolítico no potencial matricial crítico de -10 kPa. Ainda, os resultados demonstraram que a produção da parte aérea foi favorecida no potencial crítico de NR/-10 kPa, ainda assim, os potenciais críticos de -15 e -30 kPa favoreceram o desenvolvimento de raízes em LVA, mas sem alcançar o desempenho produtivo observado no NR/-10 kPa.

7 AGRADECIMENTOS

A fundação de apoio à pesquisa do Distrito Federal FAPDF pelo recurso concedido para condução do estudo por meio do edital 06/2017. Processo: 0193.002022/2017-12.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. C. S.; BOTREL, T. A.; RAINE, S. R.; CAMARGO, A. P.; PINTO, M. F.; SALVADOR, C. A. An irrigation controller mechanically actuated by soil-water tension: I – Design, development and laboratory evaluations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 21, n. 6, p. 369-373, 2017.

AZEVEDO, J.; FREIRE, A. G.; ALENCAR, T. L.; SANTOS, C. L. A.; ASSIS JÚNIOR, R. N.; BEZERRA, F. M. L.; MOTA, J. C. A. Desempenho de sistemas de leitura de tensiômetro em condições de temperatura controlada. **Irriga**, Botucatu, v. 22, n. 4, p. 735-756, 2017.

BANDEIRA, G. R. L.; PINTO, H. C. S.; MAGALHÃES, P. S.; ARAGÃO, C. A.; QUIEROZ, S. O. P.; SOUZA, E. R.; SEIDO, S. L. Manejo de irrigação para cultivo de alface em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, Recife, v. 29, n. 2, p. 237-241, 2011.

BIANCHI, A.; MASSERONI, D.; THALHEIMER, M.; MEDICI, L. O.; FACCHI, A. Field irrigation management through soil water potential measurements: a review. **Italian Journal of Agrometeorology**, Firenze, v. 22, n. 2 p. 25-38, 2017.

BITELLA, G.; ROSSI, R.; BOCHICCHIO, R.; PERNIOLA, M.; AMATO, M. A novel low-cost open-hardware platform for monitoring soil water content and multiple soil-air-vegetation parameters. **Sensors**, Basel, v. 14, n. 10, p. 19639-19659, 2014.

BRAGA, M. B.; CALGARO, M. **Uso da tensiometria no manejo da irrigação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. 28 p. (Circular Técnica, n. 235).

CARDOSO, G. G. G.; KLAR, A. E. Fracionamento da fertirrigação e seu efeito na produção da alface sob ambiente protegido. **Irriga**, Botucatu, v. 16, n. 3, p. 259-270, 2011.

CARDOSO, M. R. D.; MARCUZZO, F. F. N.; BARROS, J. R. Classificação climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40-55, 2014.

DIAMANTE, M. S.; JÚNIOR SEABRA, S.; INAGAKI, A. M.; SILVA, M. B.; DALLACORT, R. Produção e resistência ao pendoamento de alfaces tipo lisa cultivadas sob diferentes ambientes. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 133-140, 2013.

GEISENHOFF, L. O.; PEREIRA, G. M.; LIMA JUNIOR, J. A.; SILVA, A. L. P.; AVIZ, W. L. C. Produção de alface-americana em cultivo protegido utilizando mulching, sob diferentes tensões de água no solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 46-54, 2016.

GUIMARÃES, C. M.; CUNHA, F. F.; SILVA, F. C. S.; ARAÚJO, E. D.; GUIMARÃES, A. B. F.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. J. H. Agronomic performance of lettuce cultivars submitted to different irrigation depths. **Plos One**, San Francisco, v. 14, n. 12, p. 1-19, 2019.

HILLEL, D. **Environmental soil physics**, Amherst: Academic Press, 1998. 801 p.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; OLIVEIRA JÚNIOR, G. J. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. **Engineering and Science**, Cuiabá, v. 1, n. 5, p. 83-90, 2015.

MASSERONI, D.; FACCHI, A.; DEPOLI, E. V.; RENGA, F. M.; GANDOLFI, C.

Irrig-oh: An open-hardware device for soil water potential monitoring and irrigation management. **Irrigation and Drainage**, Danvers, v. 65, n. 5, p. 750-761, 2016.

MEDICI, L. O.; ROCHA, H. S.; CARVALHO, D. F.; PIMENTEL, C.; AZEVEDO, R. A. Automatic controller to water plants. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 727-730, 2010.

MONTESANO, F. F.; VAN IERSEL, M. W.; PARENTE, A. Timer versus moisture sensor-based irrigation control of soilless lettuce: Effects on yield, quality and water use efficiency. **Horticultural Science**, Prague, v. 43, n. 2, p. 67-75, 2016.

PEREIRA, R. M.; SANDRI, D.; RIOS, G. F. A.; SOUSA, D. A. O. Automation of irrigation by electronic tensiometry based on the Arduino hardware platform. **Revista Ambiente e Água**, Taubaté, v. 15, n. 4, p. 1-12, 2020.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; ALVARES, V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação**. Viçosa, MG: CFSEMG, 1999. 359 p.

ROMERO, R.; MURIEL, J. L.; GARCÍA, I.; DE LA PEÑA, D. M. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 114, p. 59-66, 2012.

SOUNDY, P.; CANTLIFFE, D. J.; HOCHMUTH, G. J.; STOFELLA, P. J. Management of nitrogen and irrigation in lettuce transplant production affects transplant root and shoot development and subsequent crop yields. **Horticultural Science**, Prague, v. 40, n. 3, p. 607-610, 2005.

- TARGA, M. S.; SILVA, M. C.; CEZAR, V. R. S. Uso de microcontrolador Arduino para a determinação da permeabilidade do solo. **Revista Técnica de Ciências Ambientais**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 1-14, 2019.
- TURNER, N. C. Imposing and maintaining soil water deficits in drought studies in pots. **Plant and Soil**, Berlin, v. 439, n. 1-2, p. 45-55, 2018.
- VALENÇA, D. C.; CARVALHO, D. F.; REINERT, F.; AZEVEDO, R. A.; PINHO, C. A.; MEDICI, L. O. Automatically controlled deficit irrigation on lettuce in “organic potponics”. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 75, n. 1, p. 52-59, 2018.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Davis, v. 44, n. 5, p. 892-897, 1980.
- VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 1991. 100 p.
- VALERIANO, T. T. B.; SANTANA, M. J.; OLIVEIRA, A. F.; MACHADO, L. J. M. Alface americana cultivada em ambiente protegido submetida a doses de potássio e lâminas de irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 3, p. 620-630, 2016.
- VIANA, S. B. A.; FERNANDES, P. D.; GHEYI, H. R.; SOARES, F. A. L.; CARNEIRO, P. T. Índices morfofisiológicos e de produção de alfaces sob estresse salino. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, p. 23-30, 2004.
- VILLAS BOAS, R. C.; CARVALHO, J. A.; GOMES, L. A. A.; SOUSA, A. M. G.; RODRIGUES, R. C.; SOUZA, K. J. Avaliação técnica e econômica da produção de duas cultivares de alface tipo crespa em função de lâminas de irrigação. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 2, p. 525-531, 2008.