

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

LARISSA COSTA MELO

**EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM CULTIVOS DE HORTALIÇAS SOB
DIFERENTES DENSIDADES DO SOLO E QUANTIDADES DE FITOMASSA DE
COBERTURA**

LAGES

2022

LARISSA COSTA MELO

**EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM CULTIVOS SUCESSIVOS DE HORTALIÇAS
SOB DIFERENTES DENSIDADES DO SOLO E QUANTIDADES DE FITOMASSA
DE COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo
Orientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

**LAGES
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pela autora**

Melo, Larissa Costa

Eficiência do uso da água em cultivos sucessivos de hortaliças sob diferentes densidades do solo e quantidades de fitomassa de cobertura / Larissa Costa Melo. -- 2022.

75p.

Orientador: Álvaro Luiz Mafra

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Lages, 2022.

1. Produtividade da água. 2. Restrição hídrica. 3. *Beta vulgaris*. 4. *Lactuca sativa*. I. Mafra, Álvaro Luiz. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

LARISSA COSTA MELO

**EFICIÊNCIA DE USO DA ÁGUA EM CULTIVOS SUCESSIVOS DE HORTALIÇAS
SOB DIFERENTES DENSIDADES DO SOLO E QUANTIDADES DE FITOMASSA
DE COBERTURA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do título de Mestra em Ciência do Solo, área de concentração em Manejo do Solo.
Orientador: Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra

Banca examinadora:

Orientador: _____
Prof. Dr. Álvaro Luiz Mafra
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC

Membro Externo: _____
Prof. Dra. Tatiana da Silva Duarte
Universidade do Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

Membro Externo: _____
Prof. Dr. Robinson Jardel Pires de Oliveira
Instituto Federal Catarinense – Campus Rio do Sul

Lages, 23 de março de 2022

Aos meus pais, Maria Luci e Osmar, por todo o apoio, direcionamento, força e incentivo. Vocês são os responsáveis por toda minha dedicação e persistência. Devo todas as conquistas da minha vida a vocês. Eu os amo imensamente.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me concedido muita perseverança e força para conseguir derrubar todos os obstáculos vivenciados neste percurso.

À minha família, por estar sempre ao meu lado incentivando e apoiando nos momentos mais difíceis que passei. Só eles sabem de todas as dificuldades encontradas nesse percurso e, mesmo assim, sempre me incentivando a nunca desistir.

Ao meu orientador, Dr. Álvaro Luiz Mafra não somente pela orientação, mas pela credibilidade que em mim depositou, pela paciência de responder minhas intermináveis dúvidas, e, por fim, por ser uma ponte para que eu alcançasse mais essa etapa.

Ao Diego Roters, Gustavo Ferreira, Roberta Alessandra, Jadiel Andognini, Maria Izabel Warmling, Cindy Fernandes, André Braga, que desde o primeiro momento ficaram ao meu lado, nunca me deixaram desanimar, sempre dividindo comigo momentos de alegria, estresse, lágrimas, angústias e desesperanças, porém seguindo firmes ao meu lado. Nunca esquecerei o companheirismo demonstrado a mim.

A todos os colegas do Laboratório de Física e Manejo do solo, e aos bolsistas João Ritter, Guilherme Parizoto, pela ajuda e colaboração neste trabalho, e em especial a bolsista Vitória Rech de Matia, que foi neste período meu braço direito em meio as atividades e funções do experimento, grata pela dedicação e cuidados ao realizar seu trabalho que foi essencial para que eu alcançasse bons resultados.

Ao CAV/UEDESC, pelo ensino gratuito e de qualidade, à CAPES pela concessão da bolsa que recebi por todo este período.

RESUMO

O uso eficiente da água é um dos grandes desafios da sociedade contemporânea, o emprego de técnicas que auxiliam no sistema produtivo, deve aumentar a eficiência do uso da mesma. Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito da produtividade da água no cultivo de beterraba e alface, sob diferentes densidades do solo e a utilização de resíduo vegetal como cobertura do solo composta pelo consórcio de aveia (*Avena sativa* L) e azevém (*Lolium multiflorum*) em três doses, 0, 5 e 10 Mg/ha, em dois solos do planalto sul catarinense, Cambissolo Húmico e Nitossolo Bruno, com e sem compactação na camada intermediária, e com e sem restrição hídrica, consistindo em um arranjo fatorial de 3x2x2, utilizado unidades experimentais constituídas de tubos de PVC com 150 mm de diâmetro e 25 cm de altura, composto por três repetições, totalizando 72 unidades amostrais. O experimento foi conduzido em casa de vegetação (CV), sendo o delineamento experimental utilizado inteiramente casualizado. Para a cultura da beterraba, a colheita foi realizada aos 80 DAT, e foram determinadas: teor de clorofila (%), número de folhas (NF), massa fresca de planta (MF) (g), diâmetro da raiz comercial (DR) (cm), teor de sólidos solúveis totais (TSS) (°Brix) e área foliar $\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$ (AF). Já no caso da alface, a colheita foi realizada aos 40 DAT, sendo determinadas: altura de planta (AP) (cm), número de folhas (NF), massa fresca (MF) (g), comprimento de raiz (CR) (cm), área foliar (AF), massa seca (MS) (g), teor de clorofila (%). As amostras de solo com estrutura preservada, foram coletadas a 7 cm de profundidade, sendo determinada as seguintes variáveis: resistência à penetração (RP), condutividade hidráulica saturada (Ks), porosidade total (PT), microporos (Micro), Macroporos (Macro), Criptoporos (Crip), Ponto de murcha permanente (PMP), Água prontamente disponível (APD), Capacidade de Campo (CC) já as com estrutura alterada, retirada ao longo de toda profundidade do vaso, sendo determinadas as seguintes variáveis: Carbono Orgânico Total (COT), Carbono Orgânico Associado aos Minerais (Coam) e Carbono orgânico Particulado (COP). Em relação aos resultados de Cambissolo Húmico, foi observado que o aumento da Ds, reduziu os valores de Ks, PT, CA e APD e com aumento na RP, Micro, Crip e PMP. A adição de Fitomassa de 10 Mg/ha⁻¹ sem compactação e sem estresse hídrico, apresentou menor Ds. Já o manejo do solo com déficit hídrico, resultou em aumento na Ds, e no teor de COT na Ds aumentada. O COP, demonstrou diferença com o aumento da Ds com a utilização de 5 Mg/ha⁻¹, inversamente demonstrado pelo tratamento com 10 Mg/ha⁻¹. No caso da beterraba, apresentou redução no DR com o déficit hídrico, já o teor de clorofila apresentou diferença com Ds aumentada. Já a EUA foi menor no tratamento com restrição hídrica. Outrora na alface, a restrição hídrica reduziu a MF e NF, já a AF e altura de plantas foram maiores no tratamento sem restrição. Nos tratamentos que utilizaram o Nitossolo Bruno, o aumento da cobertura do solo e com o aumento da Ds reduziu o Coam, diferentemente o que foi constatado pelo COT, onde solo sem cobertura com a Ds aumentada incrementou o teor de COT, e a CA não sendo afetada pela restrição hídrica. Em relação aos resultados obtidos em Nitossolo Bruno com o cultivo de beterraba, foi observado que o teor de sólidos solúveis e aumento na EUA foi maior com a Ds aumentada. A alface, apresentou teor de clorofila superior com a densidade normal, diferente com o apresentado pelo comprimento de raiz, onde com a Ds aumentada o comprimento de raiz foi maior.

Palavras-chave: Produtividade da água, restrição hídrica, *Beta vulgaris*, *Lactuca sativa*.

ABSTRACT

The efficient use of water is one of the great challenges of the contemporary age, the use of techniques that help in the production system, increase the efficiency of water use. The objective of this work was to evaluate the effect of water productivity in the cultivation of beetroot and lettuce, under different densities and the use of plant residues as soil cover composed by the intercropping of oat (*Avena sativa* L) and ryegrass (*Lolium multiflorum*) in three doses, 0, 5 and 10 Mg/ha, in two soils of the southern plateau of Santa Catarina, Humic Cambisol and Bruno Nitosol, with and without compaction in the intermediate layer, and with and without water restriction, consisting of a 3x2x2 factorial arrangement, used experimental units constituted of PVC tubes with 150 mm in diameter and 25 cm in height, composed of three replications, totalizing 72 sample units. The experiment was carried out in a greenhouse (CV), and the experimental design used was completely randomized. For the beetroot crop, the harvest was carried out at 80 DAT, and the following were determined: chlorophyll content (%), number of leaves (NL), fresh plant mass (FM) (g), commercial root diameter (RD) (cm), total soluble solids (TSS) content ($^{\circ}$ Brix) and leaf area $\text{cm}^2 \text{plant}^{-1}$ (LA). In the case of lettuce, the harvest was carried out at 40 DAT, being determined: plant height (PH) (cm), number of leaves (NL), fresh mass (FM) (g), root length (RL) (cm), leaf area (LA), dry mass (DM) (g), chlorophyll content (%). Soil samples with preserved structure were collected at a depth of 7 cm, and the following variables were determined: penetration resistance (PR), saturated hydraulic conductivity (Ks), total porosity (TP), micropores (Micro), macropores (Macro), Cryptopores (Crip), Permanent Wilting Point (PMP), Readily Available Water (RAW), Field Capacity (FC) and soil density (SD), aeration capacity (AC) and readily available water (RAW). those with altered structure, removed along the entire depth of the vessel, being determined the following variables: Total Organic Carbon (TOC), Organic Carbon Associated with Minerals (Ocam) and Particulate Organic Carbon (POC). Regarding the Humic Cambisol results, it was observed that the increase in Ds reduced the values of Ks, TP, AC and RAW and with an increase in RP, Micro, Crip and PMP. The addition of 10 Mg/ha-1 Phytomass without compaction and without water stress showed lower Ds. On the other hand, soil management with water deficit resulted in an increase in Ds, and in the TOC content in Ds increased. The POC showed a difference with the increase in SD with the use of 5 Mg/ha-1, inversely demonstrated by the treatment with 10 Mg/ha-1. In the case of beet, there was a reduction in RD with water deficit, whereas the chlorophyll content showed a difference with increased SD. The RAW was lower in the treatment with water restriction. Formerly in lettuce, water restriction reduced FM and NL, while LA and PH were higher in the treatment without restriction. In the treatments that used the Bruno Nitosol, the increase of the soil cover and with the increase of the SD reduced the Ocam, differently from what was verified by the TOC, where the soil without cover with the increased SD increased the TOC content, and the AC did not being affected by water restriction. In relation to the results obtained in Bruno Nitosol with the cultivation of beet, it was observed that the soluble solids content and increase in the RAW was greater with the increased SD. Lettuce showed higher chlorophyll content with normal density, different from that presented by root length, where with increased SD the root length was greater

Keywords: Water productivity, water restriction, beet and lettuce.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação das unidades experimentais para cultivo de beterraba e alface em casa de vegetação.	26
Figura 2 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e restrição hídrica na Densidade do Cambissolo Húmico.	34
Figura 3 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e a densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) no teor de carbono orgânico particulado (COP) em Cambissolo Húmico.	35
Figura 4 - Temperatura máxima, média e mínima do ar dentro da casa de vegetação no período de desenvolvimento da beterraba	36
Figura 5 - Efeito da restrição hídrica no teor de clorofila (Índice spad) das folhas da beterraba Boro em função da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) em Cambissolo húmico.	38
Figura 6 - Efeito da restrição hídrica na eficiência do uso da água no cultivo da beterraba Boro em Cambissolo húmico.	39
Figura 7 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na eficiência do uso da água no cultivo da beterraba Boro em Cambissolo húmico.	41
Figura 8 – Temperatura máxima, média e mínima do ar dentro da casa de vegetação no período de desenvolvimento da alface	41
Figura 9 - Efeito da restrição hídrica na eficiência do uso da água da alface cv. Margareth em Cambissolo húmico.	44
Figura 10 - Efeito da fitomassa de cobertura na eficiência do uso da água da alface cv. Margareth em Cambissolo Húmico.	45
Figura 11 - Carbono associado aos minerais de um Nitossolo Bruno em função da quantidade de fitomassa de cobertura, em diferentes densidades do solo.	46
Figura 12 - Teor de Carbono orgânico total (COT) em Nitossolo Bruno em função da interação entre a fitomassa de cobertura e a densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³).	46
Figura 13 - Efeito da interação a fitomassa de cobertura a densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) e restrição hídrica na Capacidade de aeração em Nitossolo Bruno.	47
Figura 14 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura a Ds do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) e restrição hídrica na Densidade em Nitossolo Bruno.	49

Figura 15 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura a densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) e restrição hídrica na Macroporosidade em Nitossolo Bruno.....	50
Figura 16 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na Microporosidade em Nitossolo Bruno.	51
Figura 17 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na Condutividade hidráulica saturada em Nitossolo Bruno.....	52
Figura 18 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na Capacidade de Campo em Nitossolo Bruno.	53
Figura 19 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na Resistência a Penetração em Nitossolo Bruno.	53
Figura 20 - Efeito da restrição hídrica na produtividade da alface cv. Margareth em Nitossolo Bruno.....	57
Figura 21 -Eficiência do uso da água em função da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) sob os manejos com e sem restrição hídrica no cultivo da alface cv. Margareth em Nitossolo Bruno.	58
Figura 22 - Eficiência do uso da água em função da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) sob os manejos com e sem adição de fitomassa de cobertura no cultivo da alface cv. Margareth em Nitossolo Bruno.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização física e química, dos solos coletados na camada 0 a 20 cm.....	27
Tabela 2 - Atributos físicos em função da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) em Cambissolo Húmico.	32
Tabela 3 - Teor de carbono orgânico em função da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) em Cambissolo húmico.....	35
Tabela 4 - Efeito da restrição hídrica nas características produtivas da beterraba Boro cultivada em Cambissolo Húmico, 80 dias após o transplante	37
Tabela 5 - Efeito da restrição hídrica nas características produtivas da da alface cv. Margareth cultivada em Cambissolo húmico, 40 dias após o transplante.	42
Tabela 6 - Efeito da densidade do solo (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) nas características produtivas da cultura da alface cv. Margareth em Cambissolo Húmico, 40 dias após o transplante	43
Tabela 7 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) na eficiência do uso da água e no teor de sólidos solúveis totais no cultivo de beterraba em Nitossolo Bruno, 80 dias após o transplante.	55
Tabela 8 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm ³) e aumentada (1,3 g cm ³) nas características produtivas da alface cv. Margareth em Nitossolo Bruno, 40 dias após o transplante	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AD: Água disponível

AF: Área Foliar

APD: Água prontamente disponível

CA: Capacidade de aeração

CAM: Carbono associado aos minerais

COP: Carbono orgânico particulado

COT: Carbono orgânico total

CRIP: Criptoporos

DAT: Dias após o transplante

DS: Densidade do solo

EUA: Eficiência do uso da água

MACRO: Macroporosidade

MICRO: Microporosidade

MSF: Massa seca das folhas

MST: Massa seca total

PMP: Ponto de murcha permanente

PT: Porosidade total

RP: Resistência à penetração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivos Específicos	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO DE HORTALIÇAS	17
3.1.1 Resposta da alface à disponibilidade hídrica	18
3.1.2 Resposta da beterraba à disponibilidade hídrica	19
3.2 DÉFICIT HÍDRICO.....	20
3.3 A ADIÇÃO DE FITOMASSA EM COBERTURA NA MELHORIA DO SOLO E DA ÁGUA	21
3.4 ATRIBUTOS DO SOLO E OFERTA DE ÁGUA NO SOLO	22
4 HIPÓTESES	25
5 MATERIAL E MÉTODOS	26
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6.1 Atributos físicos e carbono orgânico em cambissolo húmico	32
6.1.1 Resposta da beterraba em Cambissolo Húmico	36
6.1.2 Resposta da alface em Cambissolo Húmico	41
6.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO DO NITOSSOLO BRUNO.....	45
6.2.1 Resposta da beterraba em Nitossolo Bruno	54
6.2.2 Resposta da alface em Nitossolo Bruno	56
7 CONCLUSÕES.....	60
REFERÊNCIAS	61
ANEXOS	69

1 INTRODUÇÃO

A utilização dos recursos hídricos de maneira eficiente e adequada é um dos grandes desafios da atualidade, perante os problemas projetados pelas mudanças climáticas globais, tais como aumento da temperatura do ar, o que tende a elevar o consumo hídrico das culturas, torna-se essencial buscar maneiras de reduzir a evapotranspiração, principalmente no cultivo de hortaliças, devido ao elevado consumo hídrico (CANUTO et al., 2019).

Mediante a isso o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem as plantas a passar por períodos prolongados de estiagem, serão essenciais na manutenção da produção agrícola brasileira e mundial (NEPOMUCENO, 2001).

O déficit hídrico da planta é desencadeado quando a procura excede a oferta de água. O fornecimento é basicamente definido pela quantidade de água retida no solo até à profundidade do sistema radicular, a demanda por água é determinada pela taxa de transpiração ou evapotranspiração da cultura, incluindo tanto a transpiração das plantas quanto a evaporação do solo. A evapotranspiração é impulsionada pelo ambiente de cultivo, bem como atributos principais das culturas, como a arquitetura da planta, área foliar e desenvolvimento da planta (BLUM, 2016).

O crescimento e o potencial da produção das culturas geralmente são limitados pela deficiência hídrica e a baixa disponibilidade de nutrientes no solo, por outro lado, a aplicação de água em excesso pode aumentar o custo de produção e a lixiviação de fertilizantes. Portanto, o aumento da eficiência de uso da água, também denominada como produtividade da água, na agricultura é uma abordagem chave para mitigar a escassez de água e reduzir os problemas ambientais (MIRANDA et al., 2019). A eficiência do uso da água relaciona a produção de biomassa pela quantidade de água aplicada, sendo bastante importante o seu reconhecimento na agricultura irrigada, pois auxilia na otimização do uso da água (SILVA et al., 2013).

A olericultura é uma das atividades agrícolas em que o solo é intensamente usado, geralmente com manejo degradante, devido às frequentes e intensas operações de preparo do solo e/ou outras operações mecânicas, ligado ao curto ciclo das culturas e a incapacidade das mesmas de proteger o solo (SANTOS et al., 2019). Portanto, o emprego de sistemas de base conservacionista traz como principais benefícios a melhoria da estrutura e infiltração de água no solo, bem como controle da erosão (BERTOL et al., 2004).

O manejo do solo pode aumentar a eficiência do uso da água (EUA), bem como reduzir o uso da mesma. Tais fatores que estão atrelados a disponibilidade de água no solo são a capacidade de armazenamento de água no solo, que é favorecida de aumento da infiltração, e a cobertura do solo que tende a minimizar as perdas por evaporação da água, atua na sua retenção,

melhora a microbiota, enriquece o solo com nutrientes, diminui o impacto da chuva e a erosão (CARVALHO et al., 2005; TEÓFILO et al., 2012)

A estrutura do solo se altera pelas práticas de manejo, influenciando a produtividade por meio das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes, sendo a densidade e a porosidade as variáveis mais sensíveis ao manejo do solo, e consideradas bons indicadores da qualidade física (SEQUINATTO et al., 2014; TORMENA et al., 1999).

A compactação do solo possui relação com alguns atributos físicos, como a porosidade, a densidade, a disponibilidade e retenção de água, entre outros, de acordo com o grau de compactação, esta pode afetar negativamente a relação do solo com a planta, dificultando a penetração das raízes, reduzindo a aeração na rizosfera e prejudicando os processos metabólicos da planta. Todas estas alterações causadas ao solo são dependentes de outros fatores intrínsecos deste, principalmente da textura e matéria orgânica (MO), que determina o tamanho e distribuição de poros e densidade do solo (ANDOGNINI et al., 2020).

Diante do exposto a esta pesquisa está baseada em buscar alternativas para minimizar o efeito do aumento da densidade do solo, e melhorar a eficiência do uso da água por meio da irrigação deficitária e adição da cobertura do solo. Tendo como objetivo a avaliação da eficiência do uso da água em função da densidade do solo e adição de fitomassa de cobertura no cultivo de hortaliças sob regime de restrição hídrica em dois solos do Planalto Catarinense.

2 OBJETIVOS

Avaliar a eficiência do uso da água em função da densidade do solo, da adição de fitomassa de plantas de cobertura no cultivo de hortaliças, como alface e beterraba, sob regime de restrição hídrica, em dois solos do Planalto Catarinense.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Verificar o efeito da adição de fitomassa de cobertura, da restrição hídrica e da densidade do solo, e suas, interações, sobre os atributos físicos e químicos do solo, assim como sobre a produção de alface e beterraba.

Determinar a eficiência do uso da água pelas culturas da alface e da beterraba, em dois solos catarinenses diferentes, conforme a dose de fitomassa de cobertura, com e sem restrição hídrica e a densidade normal e aumentada do solo.

Relacionar o uso da água com atributos físicos e químicos do solo e com a produção de beterraba e alface.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA NO CULTIVO DE HORTALIÇAS

A disponibilidade de água é indispensável ao pleno desenvolvimento das culturas em todas as fases do seu crescimento. A principal fonte de água para culturas não irrigadas é a chuvas o que torna importante conhecer a capacidade de armazenamento do solo e os fatores que influenciam a utilização desse recurso pelas plantas (LIMA, 2007).

A produção de hortaliças em muitos casos está associada ao suprimento adicional de água por meio da irrigação, devido a estas culturas serem sensíveis ao estresse hídrico (RIBEIRO et al., 2014). As práticas convencionais de irrigação baseiam-se na necessidade de água da cultura, definida pela demanda da evapotranspiração, e na eficiência da aplicação da água (FRIZZONE, 2007). Com a escassez dos recursos hídricos para utilização na agricultura, as estratégias têm sido desenvolvidas para reduzir a quantidade de água aplicada nas culturas, sem afetar o seu rendimento.

O crescimento das hortaliças é particularmente sensível às condições ambientais e uma forma de analisar as respostas desses cultivos em relação ao ambiente é por meio da determinação de indicadores de eficiência (PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2012). Um dos principais indicadores é a eficiência do uso da água (EUA) que é definida pela razão entre a produção de biomassa ou produção comercial pela quantidade de água aplicada ou evapotranspirada (KUMAR; ROUPHAEL; COLLA, 2017; LIU; STÜTZEL, 2004). Sendo importante seu reconhecimento para potencializar o uso da água e reduzir deficiências provocadas pelo aumento da demanda social em relação à oferta ambiental.

O solo funciona como um armazenador temporário de água, podendo fornecer às plantas conforme suas necessidades. Durante o seu ciclo de desenvolvimento as culturas, destacam-se que cerca de 98% do volume de água apenas passa pela planta, perdendo-se posteriormente na atmosfera pelo processo de transpiração (REICHARDT; TIMM, 2004).

Como exemplo, na cultura da beterraba a maior eficiência no uso da água para cultivar Early Wonder foi de 393,1 kg ha⁻¹ mm⁻¹ e 323,9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ para Itapuã, obtidas com o controle da irrigação, realizada a partir da tensão de 15 kPa (SILVA; SILVA; KLAR, 2013). Para a cultura da alface, Silva e Queiroz (2013) observaram que o maior valor obtido para eficiência no uso da água ocorreu no manejo por tanque classe A com reposição de água em 140% da lâmina de água evaporada.

Para que uma cultura alcance elevados patamares com relação a eficiência do uso da água sem afetar sua produtividade, é recomendada a adoção de variedades de plantas que mais

se adaptem às condições edafoclimáticas de uma região (O'NEILL;SHANAHAN; SCHEPERS, 2006).

Outro aspecto de manejo é a cobertura vegetal que associada ao preparo do solo influencia de maneira positiva à capacidade de infiltração do solo (SOUZA; SOUZA; PEREIRA, 2019). A palhada apresentou eficiência para a redução da evaporação do solo e, conseqüente, redução da lâmina de irrigação no cultivo do tomateiro contribuindo de forma positiva para a eficiência do uso da água (MENDONÇA; BERÇA; SOUZA, 2019).

Além disso deve-se considerar que o manejo do solo modifica a superfície e afeta os atributos do solo como infiltração e condutividade hidráulica do solo saturado, densidade do solo, volume e distribuição do espaço poroso (OWUOR et al., 2018; PINHEIRO; TEIXEIRA; KAUFMANN, 2014). Por outro lado a densidade do solo influi de forma negativa quando há redução da porosidade, essa alteração pode diminuir a capacidade de retenção de água e gases (BRADY & WEIL, 2013). Embora nas regiões Centro-Sul do Brasil, a precipitação pluvial em geral supere as necessidades da agricultura, mas podem ocorrer problemas na distribuição dessas chuvas, torna-se necessário associar diversas práticas de manejo, como: redução da lâmina de irrigação, cobertura do solo, adubação orgânica, manutenção da qualidade do solo. Práticas que melhoram a produção nesses períodos com baixa disponibilidade de água (SILVA et al., 2020).

3.1.1 Resposta da alface à disponibilidade hídrica

A alface é uma cultura exigente em água, tornando importante o manejo adequado da irrigação (FILGUEIRA, 2013). Seu desenvolvimento vegetativo é afetado diretamente pela umidade do solo, tendo em vista a necessidade de uma aplicação de água com maior frequência e menor intensidade ao longo do ciclo da cultura (SANTOS; PEREIRA, 2004).

Aspectos relacionados à necessidade hídrica da alface vem sendo estudados há vários anos, e alguns autores relatam o efeito da umidade do solo no crescimento e rendimento da cultura. Um dos primeiros trabalhos realizados no Brasil sobre a irrigação de alface foi conduzido por Simão (1955), o qual afirma que os melhores resultados foram obtidos com aplicação de 15 mm dia⁻¹, nas condições de Piracicaba-SP, em consequência o aumento na quantidade de água aplicada foi seguido pelo acréscimo na massa da alface.

Em análise a resposta da alface a irrigação em diferentes estádios de desenvolvimento Sale (1966) observou efeitos negativos da irrigação nos estádios iniciais, indicados pela redução do crescimento das plantas quando associados a pequenos incrementos no déficit de umidade do solo. No estágio final de desenvolvimento, quando a umidade do solo foi restabelecida à condição de capacidade de campo, houve maior resposta de crescimento à irrigação. Ainda

relata que o maior requerimento de água se deu nas três semanas anteriores à colheita, quando a percentagem de cobertura do solo foi superior a 90%.

Utilizado um sistema irrigação por gotejamento manejado com base na evaporação medida no tanque Classe A, Hamada; Testazlaf (1995) afirmaram que a eficiência do uso de água apresentou respostas decrescente à medida que maiores lâminas de água foram aplicadas, sendo mais eficientes com aplicação de 60% da evaporação. A maior produção e melhor qualidade da alface para comercialização foram alcançadas no tratamento que aplicava 120% da evaporação do tanque Classe A.

A produtividade da cultura da alface apresenta correlações lineares negativas com o excesso de água no solo. O efeito do excesso de água na cultura pode ser evidenciado pela redução da área foliar e da fitomassa da parte aérea, da altura da planta além do menor diâmetro do caule, apresentando maior sensibilidade a variável massa da parte aérea (FHECHA, 2004).

Segundo Sgarbieri (1987) as folhas de alface são compostas por 94 % de água. Esse teor de água pode variar de acordo com tempo de permanência das plantas a fase final do ciclo, pois há relação quanto maior esse período, maior o acúmulo de fitomassa e menor o teor de água (OHSE et al., 2009).

3.1.2 Resposta da beterraba à disponibilidade hídrica

A falta de água no solo é um dos fatores que limita a produção da beterraba. As plantas são compostas por água cerca de 90,9% na parte aérea e nas raízes cerca de 87,3%, sendo que o período crítico à falta de umidade no solo para a cultura estende-se durante os primeiros 60 dias. E ainda quando cultivadas sob pluviosidade e temperatura elevada pode ocasionar má coloração interna e formar anéis de coloração mais esbranquiçados, com redução na concentração de pigmentos nas raízes (TIVELLI et al., 2011) e depreciação do produto comercial.

De acordo com Topak et al. (2011) a maior lucratividade das raízes da beterraba é atingida com déficit hídrico de no máximo 25% do consumo hídrico total da planta. Tivelli et al. (2011) relatam com base em estudos de evapotranspiração para a cultura da beterraba, que o período que correspondente a semeadura até a segunda semana após a emergência, necessita que 40% a 50% da água evapotranspirada seja repostada. A partir disso, tanto em sistema de semeadura direta ou por meio de transplante de mudas as plantas devem receber 75% a 85% da água evapotranspirada. E nas últimas quatro semanas que antecedem a colheita a reposição de água deve ser intensificada para 105% a 120% da água evapotranspirada e preferencialmente irrigações frequentes e leves.

3.2 DÉFICIT HÍDRICO

Existem vários fatores que podem ocasionar estresse para as plantas, Bianchi et al. (2016) ressaltam que um deles é o estresse hídrico, gerado por falta ou excesso de água. Uma planta em ambiente com excesso de água pode mostrar estresse por deficiência de oxigênio nas raízes e diminuição no aproveitamento de nutrientes e água devido à falta de energia (TAIZ et al., 2017). Além disso, a aplicação excessiva de água no solo pode ocasionar lixiviação de nutrientes para profundidades não acessíveis para a cultura (FREIRE et al., 2013).

O déficit hídrico das plantas desenvolve-se quando sua procura excede a oferta de água. O fornecimento é determinado pela quantidade de água retida no solo até a profundidade do sistema radicular das culturas, a demanda por água é definida pela taxa de transpiração ou evapotranspiração da cultura, que inclui tanto a transpiração das plantas como a evaporação do solo. A evapotranspiração é impulsionada pelo ambiente de cultivo, bem como atributos principais das culturas, como a arquitetura da planta, área foliar e desenvolvimento da planta (BLUM, 2016).

A irrigação com déficit atende somente uma fração da demanda de água da cultura por evapotranspiração. O déficit de água pode ser imposto durante todo o ciclo da cultura, ou somente nas fases não-críticas ao déficit hídrico (LIMA et al., 2012). Em hortaliças de ciclo mais rápido há necessidade de monitoramento eficiente, para que a falta de água seja evitada. Muitas vezes quando se constata déficit hídrico as plantas não se recuperam e reduzem a produção (MAROUELLI, 1996).

A evapotranspiração é o movimento ascendente da água do solo para a atmosfera, composta pela transpiração da superfície das plantas e da evaporação da superfície solo-água. Esses dois componentes são agrupados devido à dificuldade experimental em determiná-los separadamente, porque somente o efeito combinado é importante no manejo da irrigação e, também, porque a radiação solar comanda os dois (STONE, 2005).

De acordo com Allen et al. (1998), a evapotranspiração pode ser determinada com a avaliação dos fluxos de entrada e saída de água na zona radicular da cultura em um determinado período. Para o entendimento da função da água no solo, deve-se conhecer a quantidade de água contida em uma unidade de massa ou volume de solo e os valores máximos de potencial matricial a ela associados. A umidade do solo constitui-se um dos parâmetros básicos mais relevantes dentro do sistema solo-água-planta-atmosfera (JACCOUD; CASTRO, 1976).

Em condições de déficit hídrico a fotossíntese das plantas é limitada pela restrição da abertura estomática. Em baixa disponibilidade de água esse processo fisiológico vital para as

plantas resulta em decréscimos na produção de carboidratos que posteriormente seriam armazenados (SINGELS; DONALDSON; SMIT, 2005).

Topak; Süheri; Acar (2010) observaram menor rendimento da cultura da beterraba para tratamentos submetidos a déficit hídrico, com redução relativa de produção da raiz de 36,4% quando comparado com tratamentos de irrigação constante.

Para cultura da batata (cv. Monalisa) submetida ao déficit hídrico em estádios de desenvolvimento isolados, Bezerra, et al. (1999) contabilizaram decréscimo na produtividade quando o déficit foi provocado nos estádios de tuberização e enchimento de tubérculos consecutivamente. A maior produtividade foi obtida quando o déficit foi aplicado somente na fase vegetativa (18,45 Mg ha⁻¹).

Nos sistemas convencionais de produção de hortaliças o manejo do solo com intensa mecanização tem proporcionado elevação dos custos de produção e impactos ambientais consideráveis, por conseguinte surge a necessidade da adoção de uma produção que envolva formas de manejo que possibilitem a manutenção da água no solo (DE SOUZA et al., 2011).

3.3 A ADIÇÃO DE FITOMASSA EM COBERTURA NA MELHORIA DO SOLO E DA ÁGUA

A manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo é uma prática cultural que traz reconhecidos benefícios ao sistema de produção, especialmente em olericultura (SOUZA et al., 2014). Um microclima propício é criado para melhorar o desenvolvimento das plantas, ao promover a retenção de umidade e regular a temperatura do solo, além de suprimir o crescimento de plantas daninhas na área de cultivo (KHAZAEI et al., 2013; SIWEKI et al., 2007).

A utilização de plantas de cobertura beneficia as propriedades físicas do solo, influenciadas por diversos aspectos relacionados à dinâmica do sistema solo-planta, tais como a circulação de água, ar e nutrientes (STEFANOSKI et al., 2013). As propriedades físicas do solo como infiltração de água, porosidade total, formação e o tamanho dos agregados (LOSS et al., 2019) são influenciadas pela utilização destas, as quais desenvolvem a proteção física, previnem a erosão, e servem como dissipador da energia cinética da chuva (LOSS et al., 2015, 2017). Melhoram a estrutura do solo pois, propiciam a formação de bioporos com variados tamanhos, os quais auxiliam na difusão de gases no solo, na movimentação de água e no crescimento das raízes (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

Para Carvalho et al. (2011) a aplicação de resíduos vegetais na forma de cobertura do solo é uma prática agrícola que minimiza perdas de água por evaporação na superfície do solo,

com economia de uso da água. O autor ainda verificou em estudos sobre o manejo da irrigação da beterraba associada a coberturas mortas, que a maior eficiência do uso da água pela cultura foi obtida com a reposição de 70% da água evapotranspirada.

Em relação à variação da umidade do solo Berça et al. (2015) observaram no decorrer do ciclo da cultura do repolho cultivado sob irrigação por gotejamento e adição de cobertura morta, que a palhada aumentou em 3,28% o armazenamento médio de água no solo.

Além disso, a permanência de cobertura sobre o solo pode aportar carbono no sistema, conservando a qualidade do solo, pois as taxas de entrada superam as taxas de perda (MELLO,2006). Dessa forma, os resíduos dessa cobertura sobre o solo colaboram para manutenção de maiores conteúdos de água no solo e conseguem diminuir os efeitos da compactação e promover ciclagem de nutrientes (ANDRADE, 2008).

Mafra et al. (2019) recomendam que para o plantio de hortaliças em sistema de plantio direto, é necessária implantação das plantas de cobertura, para que posteriormente manejadas, formem a fitomassa radicular e aérea para realizar o plantio das mudas ou semeadura das culturas. De acordo com Oliveira et al. (2013) as gramíneas possuem maior persistência da palhada na superfície do terreno, protegem, cobrem, agregam o solo, ciclam os nutrientes e proporcionam aporte elevado de material orgânico.

3.4 ATRIBUTOS DO SOLO E OFERTA DE ÁGUA NO SOLO

A capacidade do solo em promover o crescimento do sistema radicular depende das condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas, que podem ser alteradas pelas práticas de manejo. Essas alterações afetam a produtividade das culturas através das modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes (WATANABE et al., 2000). Valores críticos de resistência à penetração podem variar de 1,5 MPa a 4,0 MPa (ROSOLEM et al., 1999) porém valores aproximados a 2 MPa já podem ocasionar ações impeditivas ao crescimento radicular (BLAINSKI; TORMENA; FIDALSKI, 2008).

A absorção de água pelas plantas é dependente de fatores relacionados ao solo, como a condutividade hidráulica, umidade, e fatores relativos à planta como densidade das raízes, profundidade, taxa de crescimento das raízes, área foliar e ainda condições atmosféricas como vento, radiação disponível (REICHARDT; TIMM, 2004).

Uma vez que intensificado o uso agrícola do solo, os atributos físico-hídricos do solo sofrem modificações, habitualmente adversas ao crescimento vegetal, que ficam mais evidentes

quando os sistemas de uso são comparados com o estado do solo ainda sob vegetação natural (SANTOS et al., 2011).

Para Castro et al. (2010) a oferta de água no solo para as espécies vegetais é altamente dependente dos fluxos de água e gases no solo, que estão diretamente relacionados com um conjunto de variáveis físicas e hídricas. Esse conteúdo de água no solo está intimamente ligado à condutividade hidráulica (HARA et al., 2018). O fornecimento de água para as plantas varia de acordo com o nível de compactação do solo e da distribuição do diâmetro de poros (STEFANOSKI et al., 2013).

De maneira geral, a porosidade de aeração ou porosidade livre de água (LIBARDI, 2005) é diretamente afetada pelos valores de densidade e pelo conteúdo de água no solo. Leão (2002) afirma que se a porosidade de aeração for menor que 10%, a taxa de fluxo de oxigênio em direção ao sistema radicular das plantas é altamente prejudicada afetando, assim, os processos fisiológicos e metabólicos, além do crescimento das raízes das plantas.

Em condições de restrição hídrica, tem-se a ocorrência da redução de valores de umidade do solo, a qual podem acarretar em limitações ao desenvolvimento do sistema radicular das plantas por meio do aumento da resistência a penetração (WATANABE et al., 2000). Para manter a umidade do solo em níveis adequados, tradicionalmente procura-se manter o conteúdo de água na faixa disponível entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (TORMENA et al., 1999).

A capacidade de campo representa a quantidade de água retida pelo solo depois que o excesso é drenado livremente. O ponto de murcha permanente indica o limite mínimo de umidade existente no solo abaixo da qual uma planta em crescimento ativo apresenta perda de turgescência das folhas, aceito como a umidade do solo que correspondente à tensão de 1.500 kPa (MAROUELLI, 1996).

Hara et al. (2018) em pesquisa relacionando a eficiência da utilização de água pelo feijoeiro em diferentes condições de umidade e densidade do solo, traz relações entre os fatores estudados de compactação e de oferta de água no solo, afirmando que na medida em que a oferta de água aumenta, a evapotranspiração e a eficiência da utilização da água aumentam para todas as faixas de valores estudados para densidade do solo.

Contudo, o preparo do solo provoca modificações na estrutura, distribuição e tamanho dos poros e teor de carbono orgânico, e altera a capacidade de retenção de água no solo e a sua disponibilidade (SILVA et al., 2005). Contudo a recuperação da estrutura pode garantir a melhoria da infiltração de água, um equilíbrio entre a infiltração e a aeração nos macroporos e o armazenamento de água nos microporos (MAFRA et al., 2019).

Portanto, as práticas de manejo e de conservação do solo e da água devem ser programadas e efetuadas a fim de manter e até mesmo melhorar seus atributos, para aumentar a capacidade produtiva do solo, sob aspectos físicos, químicos e biológicos, sem comprometer a qualidade do solo e da água (STEFANOSKI et al., 2013).

4 HIPÓTESES

A utilização de cobertura melhora a eficiência do uso da água e minimiza o efeito da restrição hídrica nos cultivos de beterraba e alface em sucessão, mesmo em solos compactados.

A fitomassa adicionada em cobertura incrementa o teor de carbono orgânico no solo após dois ciclos produtivos de hortaliças, em relação ao solo sem cobertura.

A compactação do solo reduz o desenvolvimento radicular das plantas e diminui a eficiência de uso da água.

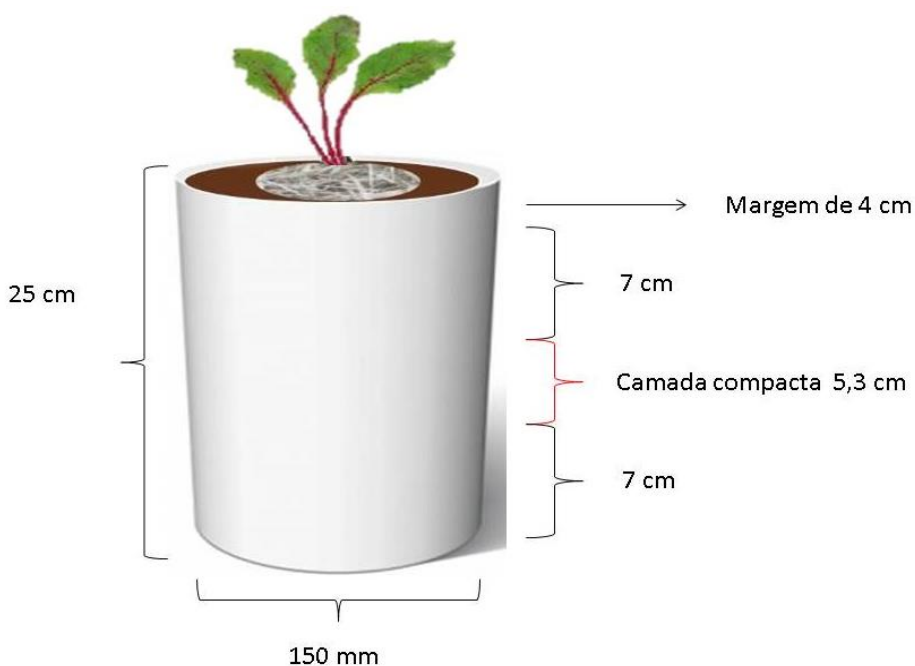
5 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido em casa de vegetação, no período de setembro de 2020 a fevereiro de 2021, na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), no Centro de Ciências Agroveterinárias (CAV), município de Lages, Santa Catarina, coordenadas 50°18'10,80" O; 27°47'31,82" S, e altitude de 920 metros. O clima é mesotérmico úmido (Cfb, segundo Köppen), com temperatura mínima média de 7 °C nos meses de junho e julho, e temperaturas máximas médias que atingem 27 °C nos meses de janeiro e fevereiro (EMBRAPA., 2004; SANTA CATARINA, 1991).

Os tratamentos consistiram em um fatorial 3x2x2, sendo uma testemunha e duas doses de fitomassa como cobertura do solo (0, 5 e 10 Mg ha⁻¹); com e sem compactação na camada intermediária do vaso; com e sem restrição hídrica, com três repetições, em delineamento inteiramente casualizado.

As unidades experimentais foram constituídas de tubos de PVC com diâmetro de 150 mm e 25 cm de altura, sendo preenchidos 21 cm com solo disposto em três camadas 7 cm (solo não compactado), deixando a margem superior de 4 cm sem preenchimento de solo para manter a fitomassa das plantas de cobertura (Figura 1).

Figura 1 - Representação das unidades experimentais para cultivo de beterraba e alface em casa de vegetação.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

Para preparar a camada com densidade aumentada na fração intermediária do vaso, foram separadas porções de solo fertilizado que tiveram teor de água e massa previamente determinados, em seguida, cilindros de madeira com mesmo diâmetro do tubo, foram utilizados para permitir a compactação, com golpes leves com socador até que a camada atingisse a altura de 5,3 cm e densidade (Ds) de 1,3 g/cm³. Citar autor.

No procedimento de montagem das unidades experimentais, na porção inferior do tubo, foi adicionada areia grossa e brita para auxílio na drenagem, e pratos plásticos arredondados como suporte ao conjunto. A fitomassa de cobertura foi posta sobre o solo e uma tela plástica foi fixada com grampos metálicos com o objetivo de evitar perdas da cobertura durante o manuseio dos vasos.

A fitomassa utilizada como cobertura foi proveniente de plantas de cobertura do solo composta pelo consórcio de aveia (*Avena sativa*) e azevém (*Lolium multiflorum*), em fase reprodutiva. O material foi acondicionado em sacos de papel pardo e seco em estufa à 65 °C por 72 horas. O material foi fragmentado com tamanho entre 5 e 10 cm, e quantificado a partir da área do vaso, em quantidades equivalentes de 5 e 10 Mg/ha de massa seca. Os solos utilizados foram Cambissolo Húmico alumínico, coletado em área experimental do Centro de Ciências Agroveterinárias, da Universidade do Estado de Santa Catarina (CAV-UDESC), (27°47'13''S; 50°18'24''O) e Nitossolo Bruno Distrófico, coletado próximo à localidade de Salto Caveiras, (27°47'12''S; 50°26'17''O) (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização física e química, dos solos coletados na camada 0 a 20 cm.

Solo	Areia	Silte	Argila	MO	pH H ₂ O	SMP	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC efe	CTC pH7
Cambissolo	14	43	42	2,7	5,0	5,0	2,3	2,4	0,6	13,70	5,78	18,8
Nitossolo	16	28	66	3,2	4,3	4,4	1,3	1,1	1,2	27,40	3,90	30,1

Fonte: Elaborada pela autora, 2022.

Os solos foram coletados na camada de 0 a 20 cm, peneirados em malha de 4,75 mm e seco ao ar. O solo foi corrigido com calcário dolomítico para pH 6,0. As culturas testes foram beterraba (*Beta vulgaris*) híbrido Boro e alface (*Lactuca Sativa*) cultivar crespa Margareth, sendo cultivadas em sucessão. A implantação da cultura da beterraba se deu em meados de setembro, com o transplante de três mudas com aproximadamente 3 a 4 folhas, para cada vaso e após 20 dias realizado o raleio, mantendo uma planta por vaso.

Os dados climáticos foram obtidos diariamente, a temperatura máxima, média e mínima da casa de vegetação por meio de termo-higrômetro digital posicionado no centro da casa de vegetação.

A adubação para beterraba empregou nitrogênio na forma de ureia e fósforo na forma de superfosfato triplo nas doses de 20 e 170 kg ha⁻¹ respectivamente, no momento do transplante, incorporados ao solo. Em cobertura no Cambissolo foram aplicados 16 kg de N e 29 kg de K₂O aos 15 dias após o transplante (DAT); 24 kg de N e 43,5 kg de K₂O aos 30 DAT; e 40 kg de N e 72 kg de K₂O aos 40 DAT. A fonte de K foi cloreto de potássio. Para o Nitossolo, as doses de nitrogênio foram as mesmas, e para a adubação potássica aplicou-se 38, 57 e 55 kg ha⁻¹ de K₂O, conforme o parcelamento citado acima.

A colheita da beterraba ocorreu aos 80 DAT e foram avaliadas as seguintes variáveis por planta: teor de clorofila (%): estimado com clorofilômetro portátil (SPAD 502, Minolta), avaliados três plantas por tratamento, sendo uma planta por vaso e três folhas por planta, em dois locais no terço mediano das folhas; número de folhas: por meio da contagem de folhas de todas as plantas; massa fresca das plantas (g): pesada em balança analítica.

Os dados foram utilizados para cálculo de produção (g/planta); diâmetro longitudinal da raiz comercial (mm): mensurado em porção transversal com paquímetro digital; teor de sólidos solúveis totais (°Brix): obtido do suco extraído pela compressão de uma fatia de cerca de 3 mm de espessura retirada na porção equatorial da raiz tuberosa, determinado em refratômetro digital, modelo MA871 e marca Milwaukee; área foliar (cm²planta⁻¹): foram recortados com tesoura, quatro retângulos foliares de 5,0 cm x 5,0 cm, Em seguida, os retângulos foram secos em estufa à 65°C, pesados em balança de precisão e calculada a área foliar (Eq. 1), conforme a metodologia de Tavares-Junior et al. (2002), adaptada por Lopes et al. (2015).

Equação 1:

$$AF = A_{ret} \cdot MSF / MS_{ret}$$

Em que: AF é a área foliar (cm²); A_{ret} é a área do retângulo foliar (cm²); MSF é a massa seca das folhas (g planta); e MS_{ret} é a média da matéria seca dos quatro retângulos foliares secos (g).

Foram mensuradas a massa fresca e seca de parte aérea e raiz (g) da beterraba. A massa fresca obtida por meio de pesagem em balança de precisão e a massa seca (g) foi avaliada em plantas secas em estufa a 65° C até o peso constante, e pesadas em balança de precisão.

O transplante da alface cultivar Margareth, ocorreu em 06 de janeiro de 2021, enquanto as mudas possuíam de 3 a 4 folhas, com três mudas por vaso e aos 14 dias realizados o raleio, selecionando uma planta por vaso.

A adubação para o Cambissolo no momento do transplante foi de 20 kg ha⁻¹ de N e 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅. A adubação de cobertura foi composta por três aplicações, a primeira aos 10 DAT com 24 kg ha⁻¹ de N e 16 kg ha⁻¹ de K₂O, a segunda 42 kg ha⁻¹ de N e 28 kg ha⁻¹ de K₂O aos 20 DAT e 54 kg ha⁻¹ de N e 36 kg ha⁻¹ de K₂O aos 30 dias após o transplante. O Nitossolo recebeu 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ no transplante das mudas e a mesma quantidade de nitrogênio que o Cambissolo. A adubação de cobertura também foi subdividida aos 10, 20 e 30 DAT, com 24, 42 e 54 kg ha⁻¹ de N e K₂O, respectivamente. As fontes dos fertilizantes NPK utilizadas nesse ciclo foram as mesmas citadas acima no cultivo da beterraba.

Aos 40 dias após o transplante a alface foi colhida, e os seguintes parâmetros foram avaliados: altura da planta (cm), número de folhas por planta, massa fresca parte aérea e raiz (g), comprimento da raiz (cm), área foliar (cm² planta⁻¹), massa seca parte aérea e raiz (g), teor de clorofila (%). A altura das plantas foi medida com régua graduada, compreendendo a medida da base da planta até a folha de altura maior. A área foliar foi obtida pelo integrador de área foliar (Licor Area Meter 3100). O teor de clorofila foi avaliado em duas folhas por planta, em dois locais no terço mediano das folhas com o auxílio do medidor de clorofila da marca Konica Minolta, modelo SPDA-502.

A reposição da água evapotranspirada foi realizada diariamente para manter o conjunto em capacidade de vaso. Uma vez por semana fez-se pesagem de todas as unidades experimentais, em balança eletrônica com capacidade de 20 kg, e nos demais dias a água evapotranspirada foi repostada, mediante a média de massa perdida durante o dia. A quantidade de água (ml/vaso) e a temperatura (°C) individual dos vasos foram mensuradas e registradas.

Os períodos de restrição hídrica durante o ciclo da beterraba foram impostos nos tratamentos aos 30 e 60 DAT. O primeiro período teve duração de sete dias, onde a redução da umidade foi em torno de 60% para os dois solos, e o segundo durou três dias, com redução de 45% da umidade no Cambissolo e 55% no Nitossolo. A duração foi determinada de acordo com as condições de temperatura e umidade e foi cessada quando as plantas apresentaram sintomas brandos de falta de água.

No ciclo da alface, o primeiro período de restrição hídrica foi aos 15 DAT e estendeu por 10 dias, com redução de umidade para 70% no Cambissolo, e 80 % no Nitossolo. A segunda restrição no fornecimento de água aconteceu aos 30 DAT, com duração de três dias devido às

condições de alta temperatura interna e externa a casa de vegetação, onde a redução da umidade foi de 60 % no Cambissolo, e de 70% no Nitossolo.

A eficiência da utilização da água foi determinada pela relação entre o consumo de água e a massa seca da planta (SILVA; SILVA; KLAR, 2013) conforme a equação (2):

Equação 2:

$$EUA = \frac{ETc}{MST}$$

Em que: EUA é a eficiência do uso da água em (ml/g);

ETc é o consumo de água total do vaso (ml);

MST é a fitomassa seca total (g).

As amostras de solo com estrutura preservada foram coletadas após a colheita das plantas a 7 cm de profundidade dentro de cada vaso, e amostras com estrutura alterada foram retiradas de toda a profundidade de 21 cm. A determinação de carbono orgânico total (COT) no solo foi realizada em analisador elementar por combustão seca (TOC). O carbono orgânico particulado (COP) foi analisado após fracionamento físico descrito por CAMBARDELLA; ELLIOTT (1992), para isso, foram utilizados 20 g de solo e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5g L⁻¹). O carbono associado aos minerais (CAM) foi obtido pela subtração do valor de COP do COT.

As amostras com estrutura preservada foram limpas e posteriormente saturadas em bandeja com água por 48 horas. Em seguida levadas à mesa de tensão de areia submetendo as tensões de 1,6 e 10 kPa (GUBIANI *et al.*, 2009). A porosidade total (PT) foi encontrada pela diferença de massa do solo saturado (mSaturado) e massa de solo seco (mSS) em estufa sob volume conhecido equação 3.

Equação 3:

$$PT = (mSaturado - mSS) / V$$

$$Micro = (mS60 - mSS) / V$$

$$Macro = PT - Micro$$

$$Ds = mSS / V$$

Em que: PT Porosidade total;

Micro: Microporosidade;

Macro: Macroporosidade; e

Ds: Densidade do solo.

O volume de microporos (Micro) foi obtido pela diferença da massa de solo após tensão de 6 kPa, em mesa de tensão de areia (EMBRAPA, 1997) e o volume de macroporos (Macro) obtido pela diferença entre a porosidade total (PT) e microporosidade. A densidade do solo (DS) foi obtida pelo método do anel volumétrico, pela relação massa (m) / volume (v) a 105 °C (BLAKE; HARTGE, 1986).

Para obtenção do volume de criptoporos (definir), água disponível (AD), água prontamente disponível (APD), as amostras de estrutura preservada foram saturadas e submetidas à tensão de 1500 kPa em câmara de Richards. A condutividade hidráulica saturada (Ks) foi determinada em amostras saturadas e colocadas em permeâmetro de carga variável utilizando-se a metodologia descrita em Gubiani et al. (2010).

A resistência à penetração (RP) foi determinada em amostras colocadas em mesa de tensão de areia a 10 kPa, para padronizar a umidade e posteriormente realizou-se o ensaio pelo aparelho de bancada marca Marconi, modelo MA 933 equipado com cone de 3,0 mm de diâmetro, o qual foi introduzido nas amostras até a profundidade de 2,5 cm mantendo a velocidade de medição constante em 30 mm min⁻¹ e leituras a cada 1s, com registros automáticos que geraram uma série de dados para cada amostra, com os quais foi calculada a média de cada amostra.

Os resultados obtidos foram submetidos à teste de homogeneidade de variância e normalidade, e a análise de variância. A comparação dos tratamentos para os fatores qualitativos foi feita pelo teste Tukey a 5% de probabilidade. Para o fator quantidade de fitomassa de cobertura efetuou-se análise de regressão, testando modelo linear com nível de significância de 5%. Os dados foram submetidos à análise de correlação de Pearson com nível de significância de 5%. Todos os testes foram executados no programa Sigmaplot 12.5.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 ATRIBUTOS FÍSICOS E CARBONO ORGÂNICO EM CAMBISSOLO HÚMICO

O aumento da densidade do solo reduziu os valores de condutividade hidráulica saturada (Ks), porosidade total do solo (PT), macroporosidade, capacidade de aeração (CA) e água prontamente disponível (APD). Além disso, aumentou a resistência à penetração do solo (RP), a microporosidade do solo, quantidade de criptoporos (Crip) e o ponto de murcha permanente (PMP), tais valores podem ser observados na tabela 2.

Tabela 2 - Atributos físicos em função da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) em Cambissolo Húmico.

Densidade	RP MPa	Ks (mm/h ⁻¹)	PT	Micro	Macro	Crip	CA	PMP	APD	CC
Normal	1,8 b	200 a	0,55 a	0,40 b	0,15 a	0,31b	0,15 a	0,31b	0,03 a	0,38b
Aumentada	4,1 a	22 b	0,50b	0,42 a	0,07 b	0,35a	0,09 b	0,35 a	0,02 b	0,41a
CV (%)	57,0	110,0	7,2	5,8	45,0	7,4	40,0	7,4	23,4	6,0

Médias seguidas de letras minúsculas diferentes na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (RP) resistência à penetração; (Ks) condutividade hidráulica saturada; (PT) porosidade total; (Micro) microporos; (Macro) macroporos; (Crip) criptoporos; (PMP) ponto de murcha permanente; (APD) água prontamente disponível; (CC) capacidade de campo. Fonte: elaborado pela autora, 2021.

A Ks diminuiu de 200 mm h⁻¹ na Ds normal para 22 mm h⁻¹ com a Ds aumentada. Andognini et al. (2020) constataram que a Ks foi reduzida de acordo com o aumento do grau de compactação (GC) de 175 para 10 mm h⁻¹ do grau de compactação de 80% para o grau de compactação de 100%. Esta propriedade possui relação com a distribuição do tamanho de poros, textura, porosidade drenável e densidade do solo, principalmente apresenta correlação com a macroporosidade do solo (SORACCO et al., 2012). Da mesma forma, a Ds aumentada do solo reduziu a macroporosidade e conseqüentemente apresentou menor Ks.

A resistência à penetração do solo para Ds normal foi 1,8 Mpa, abaixo de 2,0 MPa, considerado limite crítico por alguns autores (LIMA et al., 2012; SILVA et al., 2008; TORMENA et al., 1999). Em contrapartida o aumento da Ds ocasionou alta RP, comportamento semelhante observado por Sari (2021), em Cambissolo húmico. A estrutura do solo e o grau de compactação são fatores importantes que influenciam o crescimento das raízes das plantas, principalmente hortaliças sensíveis à disponibilidade de água e ao crescimento radicular. O espaço poroso e a resistência mecânica são modificados negativamente pela compactação do solo (BERTOLLO; LEVIEN, 2019).

Andognini et al. (2020) observou em Cambissolo húmico, que o aumento do grau de compactação do solo elevou a resistência à penetração e a microporosidade, mas reduziu a PT, macroporosidade e Ks, o que corrobora com os resultados encontrados nesta pesquisa.

A porosidade total esteve igual ou acima de $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a microporosidade acima de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, a macroporosidade superior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a água prontamente disponível em torno de $0,03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para o tratamento com Ds normal do solo, esse valor de macroporosidade $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é considerado adequado para as plantas em termos de garantia de aeração do sistema radicular, cujo limite crítico é de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (REYNOLDS et al., 2002). Na condição de Ds aumentada, a macroporosidade apresentou média de $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e a APD em torno de $0,02 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Estes valores indicam que principalmente pela baixa macroporosidade o solo apresenta restrições ao crescimento e desenvolvimento de plantas (BELTRAME et al., 1981).

Esta diminuição do tamanho e da distribuição dos poros altera as características de retenção e fluxo de água e ar. Os macroporos são os principais responsáveis pela infiltração de água e aeração (BELTRAME et al., 1981; RICHARD et al., 2001).

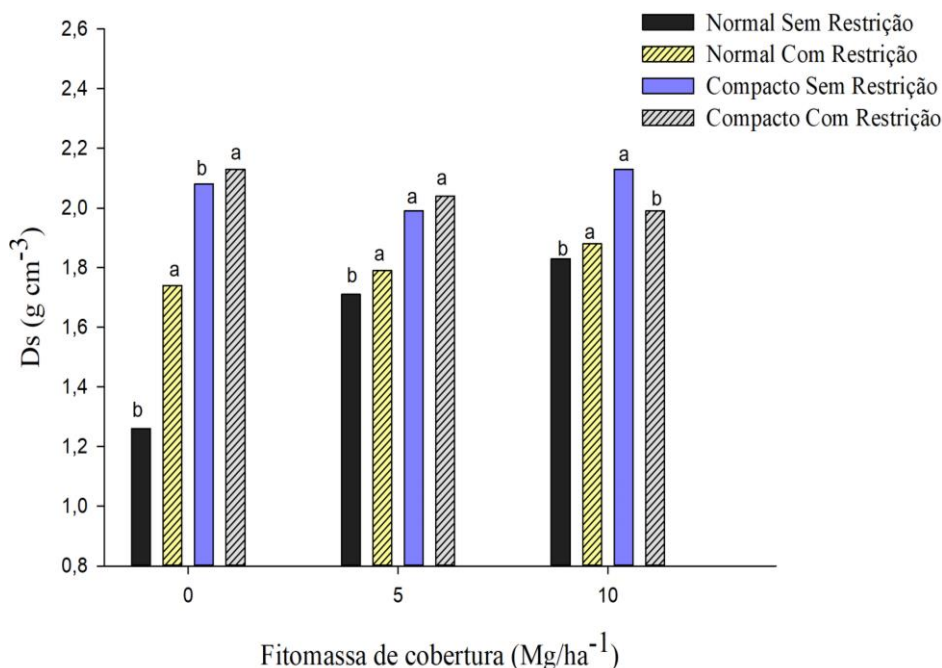
Associado à microporosidade a capacidade de campo reflete a porção de poros que retém água após a drenagem natural do solo. Os microporos são aqueles menores que $50 \mu\text{m}$, enquanto os poros responsáveis pela retenção de água na capacidade de campo têm diâmetro inferior a $30 \mu\text{m}$ (SARI, 2021).

No Cambissolo houve um aumento na capacidade de campo de $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para $0,41 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, quando a Ds foi aumentada, o que é favorável para o bom desenvolvimento das culturas pois amplia o volume de água armazenado. Sari (2021) obteve valores de $0,25$ a $0,31 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ para este mesmo solo em experimento de casa de vegetação no cultivo de hortaliças folhosas. Costa et al. (2013) relatam que nos horizontes superficiais a CC e o PMP são maiores em Cambissolos especialmente nos húmicos, em torno de $0,55$ e $0,37$ respectivamente.

Foi observado aumento no volume de criptoporos conforme o aumento da Ds do solo de $0,31$ para $0,35 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Os criptoporos são aqueles com diâmetro menor que $0,1 \mu\text{m}$ e quanto maior o volume de criptoporos, maior será a quantidade de água não disponível retida no solo. O valor encontrado por Sari (2021) de $0,15 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ difere do obtido neste estudo para o Cambissolo húmico.

Houve diferença para os tratamentos com e sem restrição hídrica para o solo descoberto sem compactação (Figura 2). A Ds foi inferior ($1,26 \text{ g cm}^3$) sem restrição hídrica e com restrição apresentou média de $1,74 \text{ g cm}^{-3}$, ou seja, o déficit de água ocasionou aumento da densidade para o manejo sem fitomassa de cobertura.

Figura 2 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e restrição hídrica na Densidade do Cambissolo Húmico.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem entre os tratamentos pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (DS) Densidade do solo. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A adição da fitomassa de cobertura de 5 Mg/ha⁻¹ não apresentou diferença para o solo compactado nos manejos com e sem restrição hídrica. Para Ds normal o comportamento da densidade foi semelhante ao solo descoberto.

A fitomassa de cobertura adicionada na dose de 10 Mg ha⁻¹ sob solo sem compactação e sem estresse hídrico apresentou a menor Ds 1,8 g cm⁻³ em relação as demais condições de manejo para essa cobertura. O solo compacto sem déficit hídrico aumentou a Ds para 2,1 g cm⁻³. A fitomassa adicionada em cobertura não conseguiu minimizar os efeitos da compactação do solo em Cambissolo húmico, pois esse efeito é observado quando o sistema radicular das plantas de cobertura se desenvolvem no solo onde as gramíneas conseguem atribuir melhorias estruturais no solo, mas mediante semeadura e desenvolvimento vegetal (SILVA; MIELNICZUK, 1997). No caso desse experimento o resíduo foi depositado somente em cobertura no solo não sendo observado esse efeito de descompactação via raízes.

O manejo com déficit hídrico do solo resultou em aumento da densidade, é importante salientar que o solo foi inicialmente peneirado e posteriormente inserido nos vasos, podendo ter sofrido acomodação das partículas com os ciclos de umedecimento e secamento, assim, provocando o aumento da densidade após os ciclos, esse aumento na Ds em Cambissolo Húmico também foi observado por Sari, (2021) após três ciclos de cultivo de hortaliças em vasos.

O carbono orgânico total apresentou alteração com a elevação da Ds do solo 42,81 g kg⁻¹, enquanto para Ds normal a média foi de 41,82 g kg⁻¹ (Tabela 3)

Tabela 3 - Teor de Carbono orgânico em função da densidade normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) do Cambissolo húmico.

Densidade	Coam	COT
	(g kg ⁻¹)	
Normal	33,9 ns	41,8 b
Aumentada	34,6 ns	42,8 a
CV (%)	4,0	3,3

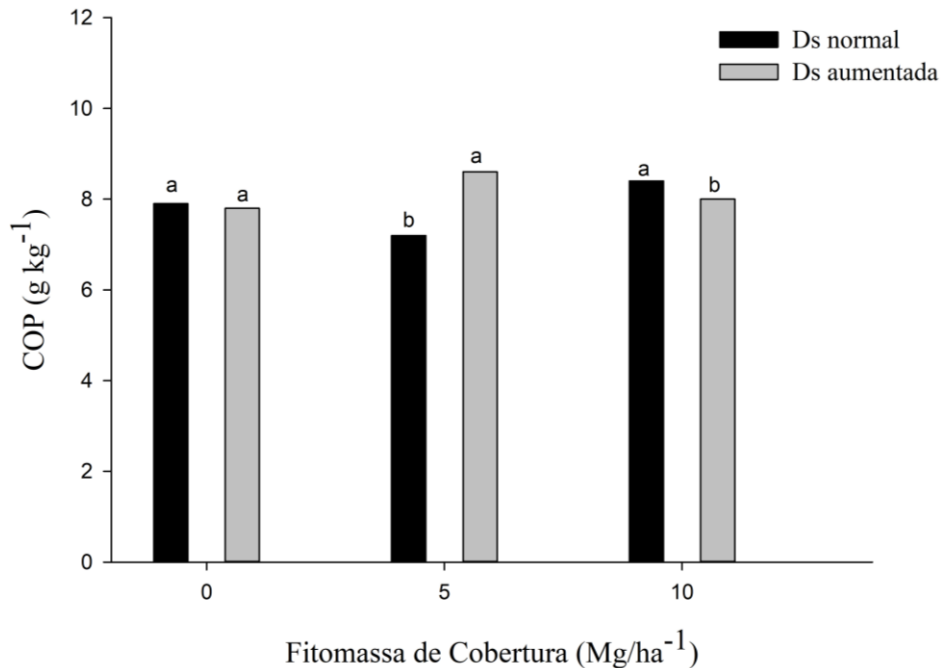
Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (COam) Carbono associado aos minerais; (COT) Carbono orgânico total. Fonte: elaborada pela autora, 2022.

O carbono orgânico total (COT) avaliado em Cambissolo húmico por Boeira (2020), apresentou teor de 46,9 g kg⁻¹. Os teores de COT de horizontes superficiais em Cambissolo húmico alumínico típico no município de Lages, foram estimados entre 23,65 a 35,3 g kg⁻¹ (ALMEIDA et al., 2019).

O carbono orgânico particulado (COP) foi semelhante entre os tratamentos para o solo sem cobertura (figura 3), com médias entre 7,8 g kg⁻¹ dentro do esperado para este solo. O uso de cobertura mostrou diferenças entre as densidades do solo, a Ds aumentada proporcionou alteração no COP 8,6 g kg⁻¹ com a adição de 5 Mg ha⁻¹ em relação a Ds normal 7,2 g kg⁻¹ esse resultado pode estar relacionado ao fato de. O comportamento do COP para a cobertura de 10 Mg/ha⁻¹ ocorreu de forma inversa o aumento da Ds proporcionou leve redução nos teores de 8,4 para 8,0 Mg ha⁻¹.

A adição de fitomassa de cobertura resultou em leves incrementos no teor de COP para o Cambissolo Húmico (Figura 3). O Manejo do solo relacionado a presença de cobertura influencia no comportamento de COP, esta alteração pode ser observada ao longo do tempo, diferente de COT onde o resultado pode ser encontrado no primeiro ano de adoção de sistemas conservacionistas (ROTTERS et al., 2021).

Figura 3 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e a densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) no teor de carbono orgânico particulado (COP) em Cambissolo Húmico.



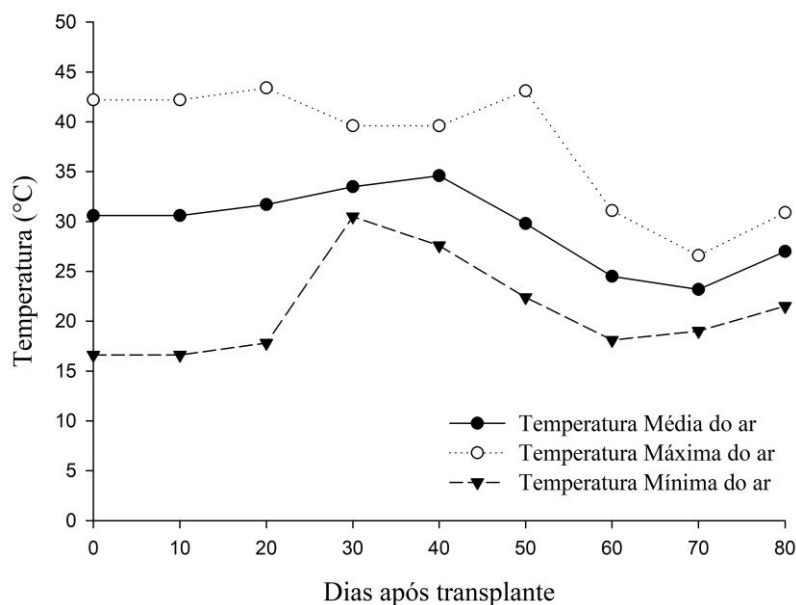
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem os tratamentos pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

As variáveis carbono associado aos minerais (COAM) e água disponível (AD), foram semelhantes entre os tratamentos ($p > 0,05$). Na análise de regressão linear as variáveis, água prontamente disponível (APD), capacidade de aeração (CA), densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica (Ksat), resistência à penetração (RP) e carbono orgânico particulado (COP) também foram semelhantes para as doses de fitomassa de cobertura.

6.1.1 Resposta da beterraba em Cambissolo Húmico

A temperatura média da casa de vegetação durante o cultivo foi de 29,3°C com máxima de 43,4°C e mínima de 16,6°C. Segundo Tivelli et al. (2011), a beterraba é típica de clima temperado, seu pico de produção ocorre em temperaturas amenas, com melhor desenvolvimento em 25°C ou próximas de 20°C respectivamente (Figura 4).

Figura 4 – Temperatura máxima, média e mínima do ar dentro da casa de vegetação no período de desenvolvimento da beterraba.



Fonte: Elaborada pela autora (2021)

O manejo com déficit hídrico proporcionou redução nas características de produção da beterraba. Reduzindo o diâmetro de raiz (DR), a massa fresca e seca de raiz e conseqüentemente a massa seca total da planta (Tabela 4).

Tabela 4 – Efeito da restrição hídrica nas características produtivas da beterraba Boro cultivada em Cambissolo Húmico, 80 dias após o transplante.

Fator	DR (mm)	MFR MSR MST (g planta ⁻¹)		
		Sem restrição hídrica	66,0 a	122,4 a
Com restrição hídrica	63,0 b	100,0 b	11,3 b	20,9 b
CV (%)	5,1	24,9	31,0	22,8

Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (DR) diâmetro raiz (MFR) massa fresca raiz; (MSR) massa seca raiz; (MST) massa seca total. Fonte: Elaborada pela autora, 2021.

No experimento em casa de vegetação na avaliação da beterraba cv. Boro irrigada utilizando o solo representativo da região um Cambissolo Háplico no Alto Vale do Itajaí foi encontrado melhor desempenho e produtividade com a utilização de 130% da evapotranspiração da cultura, com massa fresca de raiz média de 95,7 g colhidas aos 60 dias após o transplante das mudas (FRUET et al., 2019). A massa fresca da raiz da beterraba cv. Boro apresentou média de 120,0 g em experimento realizado por Correa; Cardoso, (2017) em casa de vegetação, valor aproximado ao que foi obtido neste experimento. Segundo Filgueira (2008) a deficiência hídrica na planta da beterraba é indesejável, mesmo que por ocasião da colheita, pois diminuí a produtividade da raiz tuberosa. Em estudos nas regiões semiáridas,

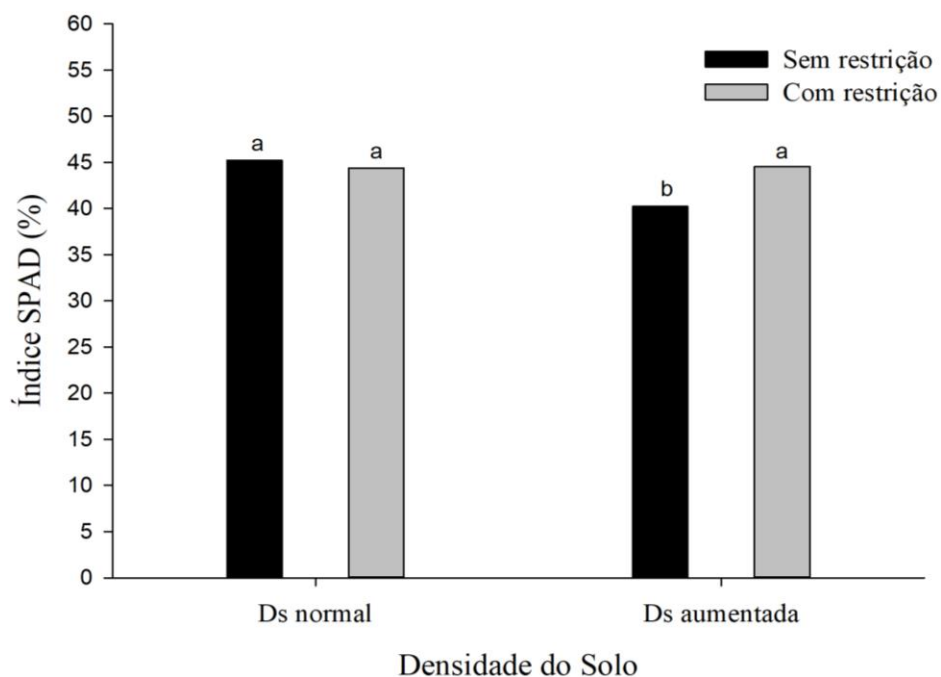
irrigações abaixo do consumo hídrico da beterraba açucareira provocaram reduções na massa seca total das plantas e consequente queda na produção comercial da cultura, sendo que os maiores valores de biomassa seca foram obtidos em irrigação plena com 100% da evapotranspiração, resultado semelhante ao ocasionado neste trabalho pela restrição hídrica (TOPAK; SÜHERI; ACAR, 2011).

O diâmetro das raízes foi de 6,6 cm no manejo sem restrição e reduziu para 6,3 cm com restrição, ambos de acordo com padrões comerciais para o cultivo (CEAGESP, 2021).

O estresse hídrico diminuiu significativamente o diâmetro do bulbo e a massa fresca da raiz do rabanete e consequentemente a produção final em torno de 50% (BREGONCI et al., 2008).

O teor de clorofila (Índice spad) foi semelhante entre as plantas cultivadas em densidade normal (Figura 5), com valores médios de 45,2 a 44,3 dentro da faixa observada para a espécie. Leituras abaixo de 45,4 (Índice spad) podem representar a faixa inadequada do teor de N nas folhas de beterraba (SEXTON; CARROLL, 2002). Para o híbrido de beterraba boro foi observada uma variação no teor de clorofila entre 46,25 e 53,48 em Cambissolo Húmico (FRUET et al., 2019).

Figura 5 - Efeito da restrição hídrica no teor de clorofila (Índice spad) das folhas da beterraba Boro em função da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) em Cambissolo Húmico.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada densidade do solo diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (DS) Densidade do solo. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

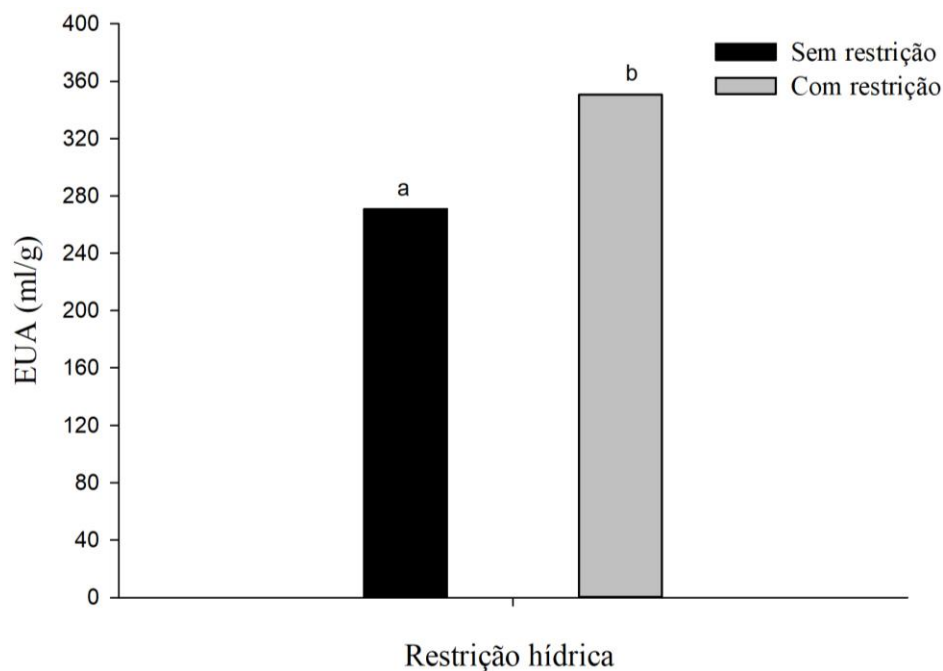
A restrição hídrica aumentou o teor de clorofila (Índice spad) em solo com Ds aumentada, onde o índice spad apresentou uma média de 45%, e o tratamento sem restrição hídrica obteve-se a média em torno de 40,22%. Assim, a densidade do solo aumentada aliada ao déficit hídrico elevaram o teor de clorofila nas folhas da beterraba. Esse comportamento também foi observado para a rúcula onde, Nalim et al., (2018) concluíram que na medida que se reduziu o suprimento hídrico aumentou o índice SPAD. Enquanto, Souza et al. (2021) não observaram efeito da restrição hídrica na intensidade da cor (Índice spad) na cultura da cebolinha obtendo médias em torno de 33,72 %.

Em cana de açúcar foi observada redução nos teores de clorofila no tratamento sem déficit hídrico, os autores justificam que o excesso de água pode promover queda dos teores de clorofila nas folhas devido a anaerobiose na zona radicular (VIEIRA et al., 2014).

A beterraba apresenta boa adaptação ao déficit hídrico (PIMENTEL, 1998) por conta de um mecanismo de ajuste osmótico que interage na manutenção do turgor celular, permitindo que ocorra os processos de crescimento vegetal e transpiração mesmo sob potenciais hídricos relativamente mais baixos sendo considerado uma aclimatação que faz com que a planta use melhor a água contida no solo (SILVA *et al.*, 2015).

A EUA da beterraba em Cambissolo Húmico foi menor na condição de restrição hídrica em comparação com o cultivo sem restrição (Figura 6).

Figura 6 - Efeito da restrição hídrica na eficiência do uso da água no cultivo da beterraba Boro em Cambissolo húmico.



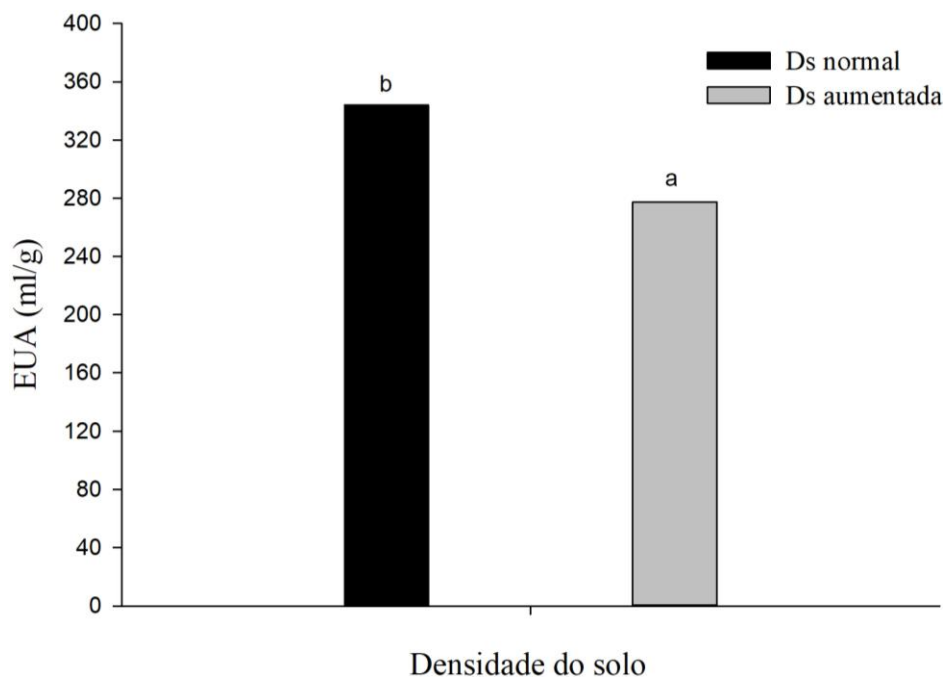
Médias seguidas de letras minúsculas dentro da restrição hídrica diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Os tratamentos que passaram por períodos restritivos ao fornecimento de água, necessitaram de mais água para a produção de biomassa (350 ml/g), enquanto a reposição contínua da evapotranspiração obteve 271 ml/g. Em hortaliças a ocorrência de déficit hídrico compromete a qualidade e produtividade decorrente ao ciclo de curta duração e do alto teor de água em sua constituição. Portanto, o estresse pode levar ao baixo rendimento e prejuízos na produção (SILVA; SILVA; KLAR, 2013).

Os resultados obtidos mostram que nem sempre o cultivo sob déficit hídrico pode ser vantajoso, pois a quantidade de água fornecida pode ser inferior a quantidade requerida pela cultura. O ambiente protegido atrelado a restrição hídrica pode ter condicionado uma condição de déficit de pressão de vapor da atmosfera (DPV), baixas condições de umidade no solo provocam a DPV, tornando a transpiração mais limitada. O aumento na DPV provoca mais demanda da atmosfera por água, elevando a perda de água por unidade de CO_2 fixada, refletindo na redução da eficiência do uso da água (SINCLAIR et al., 2017; UNKOVICH; BALDOCK; FARQUHARSON, 2018).

A eficiência do uso da água sofreu influência de forma isolada da Ds do solo, onde o tratamento compactado melhorou a relação entre a produção comercial pela quantidade de água aplicada. A eficiência do uso foi quantificada em 277,3 ml/g para o tratamento com solo compactado e 344,0 ml/g para o solo sem compactação (Figura 7).

Figura 7 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na eficiência do uso da água no cultivo da beterraba Boro em Cambissolo húmico.



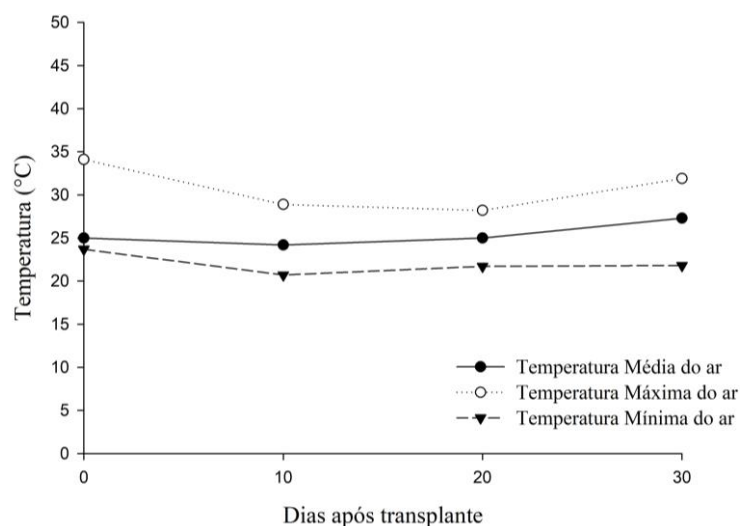
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada densidade do solo diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (DS) Densidade do solo. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

O aumento na densidade resulta no acréscimo de massa por unidade de volume e eleva a microporosidade (BEUTLER *et al.*, 2005), que é relacionada com maior armazenamento de água e pode justificar a maior eficiência de uso da água (LIBARDI, 2005).

6.1.2 Resposta da alface em Cambissolo Húmico

A temperatura do ar da casa de vegetação apresentou média de 25,4 °C durante todo o experimento. As temperaturas máximas atingiram em torno de 34,1°C. A temperatura mínima média durante o experimento foi de 20,7°C (Figura 8). A alface é uma planta influenciada pelas condições de ambiente, sendo seu desenvolvimento ideal na faixa de 15,5 e 18,3 °C, porém tolera temperaturas entre 26,6 e 29,4 °C. A temperatura máxima tolerável para a maioria das cultivares fica em torno de 30°C (DUARTE *et al.*, 1992) Tendo variação ótima de 4 a 27 °C (PUIATTI; FINGER, 2009).

Figura 8 – Temperatura máxima, média e mínima do ar dentro da casa de vegetação no período de desenvolvimento da alface.



Fonte: Elaborada pela autora (2021).

A restrição hídrica reduziu a massa fresca das plantas de 190,9 para 162,7 (g planta⁻¹) e, conseqüentemente, o número de folhas produzidas de 25 para o que indica a necessidade de água para a formação e crescimento de novas folhas para a cultura da alface. De acordo com Fátima et al. (2018), o crescimento e a fitomassa da alface é restringido pelo déficit de água no solo. A área foliar (AF) para o tratamento sem restrição foi maior 3348 cm² em relação ao tratamento com restrição hídrica 2795 cm² (Tabela 5).

Tabela 5 - Efeito da restrição hídrica nas características produtivas da alface cv. Margareth cultivada em Cambissolo húmico 40 dias após o transplante.

Fator	NF	AF (cm ²)	AT (cm)	MSF MF	
				(g/planta ⁻¹)	
Sem restrição hídrica	25,0 a	3347,8 a	21,2 a	10,0 a	190,9 a
Com restrição hídrica	22,0 b	2795,2 b	20,1 b	7,8 b	162,7 b
C.V. (%)	10,2	17,7	7,4	32,2	18,2

Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (NF) Número de folhas por planta; (AF) Área foliar; (AT) Altura de planta; (MSF) Massa seca das folhas; (MF) Massa fresca da planta.

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

Para a altura das plantas de alface observou-se o mesmo comportamento, com maior altura de planta para o tratamento sem restrição hídrica. Observou-se que as plantas de maior altura, tiveram maior área foliar. Uma maior área foliar favorece a transformação de energia solar em energia química, e conseqüentemente a planta aproveita em todo o seu metabolismo. Para Taiz; Zeiger (2009), no momento que a disponibilidade hídrica é baixa, o desenvolvimento

das folhas limita-se, pois há economia da energia que seria gasta para a sua produção, sendo reservada para a utilização em suas funções fisiológicas.

Em condições de restrição hídrica moderada, é observada redução no crescimento vegetal, pois ocorre diminuição da expansão e divisão celular, já em casos de o estresse hídrico tornar-se severo a fotossíntese é prejudicada pelo fechamento estomático (DUARTE, 2012).

A massa fresca de folhas, o número de folhas por planta e a altura de planta foram afetadas pela restrição hídrica em cultivares de alface crespa (JÚNIOR; NETO, 2021), corroborando com os resultados obtidos neste estudo. Os efeitos do estresse hídrico no número de folhas e na altura das plantas da alface também foram observados por Fátima et al. (2018), notando redução de 15 e 32% inferiores aos obtidos com a aplicação da lâmina de 100% da evapotranspiração da cultura.

Houve diferença entre os tratamentos quanto ao **teor de clorofila das folhas, o comprimento de raiz** e a massa seca das folhas de alface, sendo que o tratamento com Ds do solo aumentada foi superior em relação ao tratamento com Ds do solo normal (Tabela 6).

Tabela 6 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) nas características produtivas da cultura da alface cv. Margareth em Cambissolo Húmico 40 dias após o transplante.

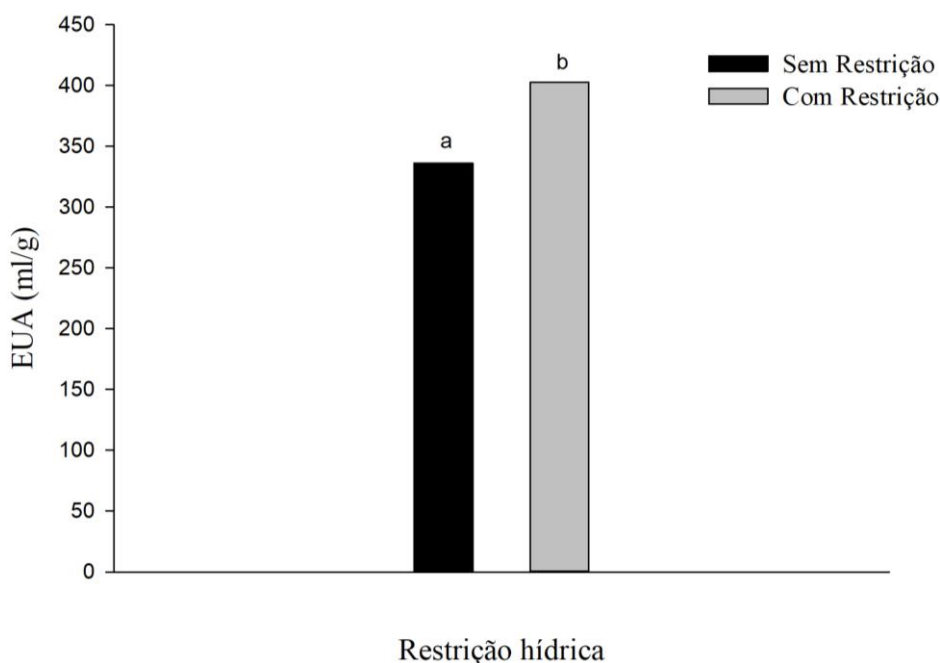
Fator	Spad (%)	CR (cm)	MSF (g/planta⁻¹)
Ds normal	18,9 b	8,55 b	7,82 b
Ds aumentada	21,8 a	11,18 a	9,95 a
C.V. (%)	18,7	27,1	32,2

Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (Spad) teor de clorofila; (CR) Comprimento de raiz; (MSF) Massa seca das folhas. Fonte: elaborada pela autora, 2021.

A compactação aumenta a retenção de água no solo, tanto na capacidade de campo quanto no ponto de murcha permanente (ANDOGNINI et al., 2020), sendo que na condição experimental, a compactação favoreceu a maior retenção de água pelo aumento dos microporos sem impedir o crescimento radicular, também favorecendo outras variáveis biométricas das plantas. Portanto, o aumento no teor de clorofila, no comprimento de raiz e massa seca das folhas de alface em Ds aumentada, pode estar relacionado a maior na disponibilidade hídrica. Comportamento semelhante foi observado por Hara et al. (2018) estudando o efeito dos níveis de densidade do solo na disponibilidade hídrica para o feijoeiro, relatam que em condições de densidade do solo elevada há maior oferta de água no solo.

A EUA foi maior na ausência de restrição hídrica, com menor gasto de água para a produção de fitomassa na cultura da alface em Cambissolo húmico, comparativamente à situação de restrição hídrica. Para que o manejo seja eficiente é necessário menor gasto de água para a produção de biomassa, com isso, obteve-se valor médio de EUA 336 ml/g para o tratamento sem restrição hídrica e média de EUA de 403 ml/g para o tratamento com restrição hídrica (Figura 9). Para a maioria das culturas agrícolas, a aplicação de água abaixo dos requisitos hídricos necessários para a máxima produção das culturas, aumenta a eficiência do uso da água (LI et al., 2018; LIMA et al., 2018; MEDICI et al., 2014) O que não foi observado neste estudo, pois as respostas das plantas ao déficit hídrico dependem da quantidade de água perdida na transpiração, da duração da condição estressante (BELL et al., 2020).

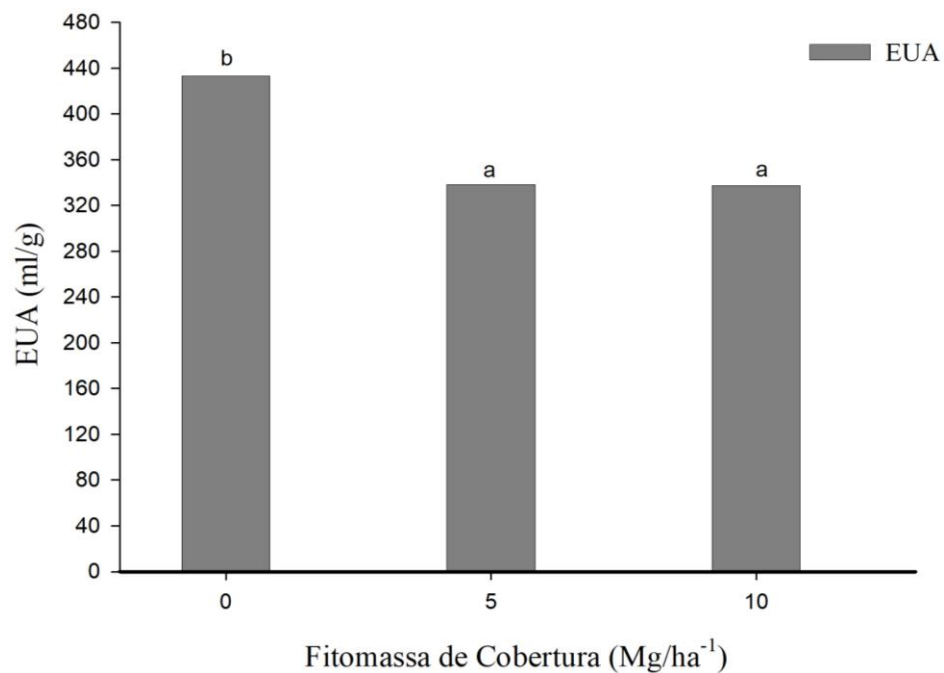
Figura 9 - Efeito da restrição hídrica na eficiência do uso da água da alface cv. Margareth em Cambissolo Húmico.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro da restrição hídrica diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A medida em que a produção declina na mesma proporção do déficit hídrico, a redução da irrigação não se tornará vantajosa, pois a eficiência do uso da água ficará constante (COMAS et al., 2019). A cobertura do solo contribuiu para o aumento da eficiência do uso da água na cultura da alface, porém, as diferentes doses de cobertura não proporcionaram diferenças significativas entre si resultando em média 338,0 ml/g da EUA (Figura 10).

Figura 10 - Efeito da fitomassa de cobertura na eficiência do uso da água da alface cv. Margareth em Cambissolo Húmico.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A cobertura morta colaborou para a redução da evaporação do solo e, conseqüentemente, auxiliou na redução do consumo de água no cultivo do tomateiro aumentando a eficiência do uso da água em ambiente protegido (MENDONÇA; BERÇA; SOUZA, 2019). A nível de campo a palhada pode proporcionar aumento na eficiência do uso da água para o cultivo de pimentão (DE SOUZA et al., 2011).

Para a cultura do repolho, a eficiência o uso da água proporcionada pela adição de resíduo vegetal no solo chegou a ser 17% maior que no tratamento sem cobertura. Essa maior eficiência é atingida quando a quantidade de cobertura morta é adequada, sendo capaz de reduzir, portanto, as perdas por evaporação da água no perfil do solo (BERÇA et al., 2015).

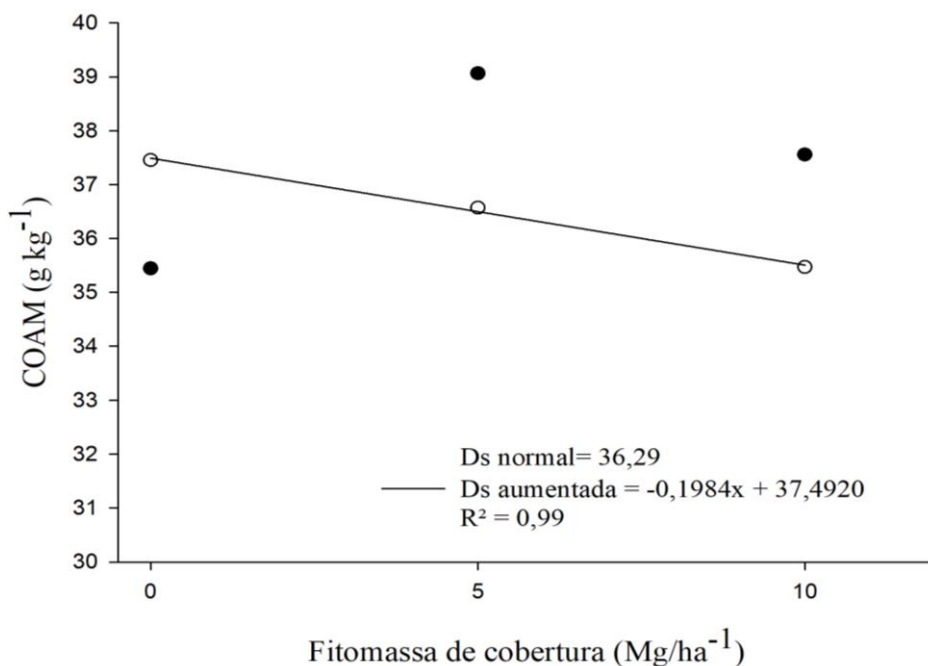
6.2 ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICO DO NITOSSOLO BRUNO

O aumento da cobertura do solo reduziu o teor de carbono orgânico associado aos minerais (COam), de acordo com o aumento da Ds do solo (Figura 11). Em um Nitossolo vermelho de textura argilosa, Braida et al., (2010) observaram que as amostras de solo com maior densidade estão associadas a um teor médio menor de carbono orgânico.

O COam é menos modificado pelas formas de uso e manejo adotadas, principalmente a curto prazo. Pelo fato de interagir com a fração argila do solo acaba respondendo de modo lento

aos efeitos do manejo do solo, tornando-se assim, mais estável no sistema, principalmente nos solos argilosos e muito argiloso (BAYER et al., 2004; DORTZBACH et al., 2020).

Figura 11 - Carbono associado aos minerais de um Nitossolo Bruno em função da quantidade de fitomassa de cobertura, em diferentes densidades do solo.

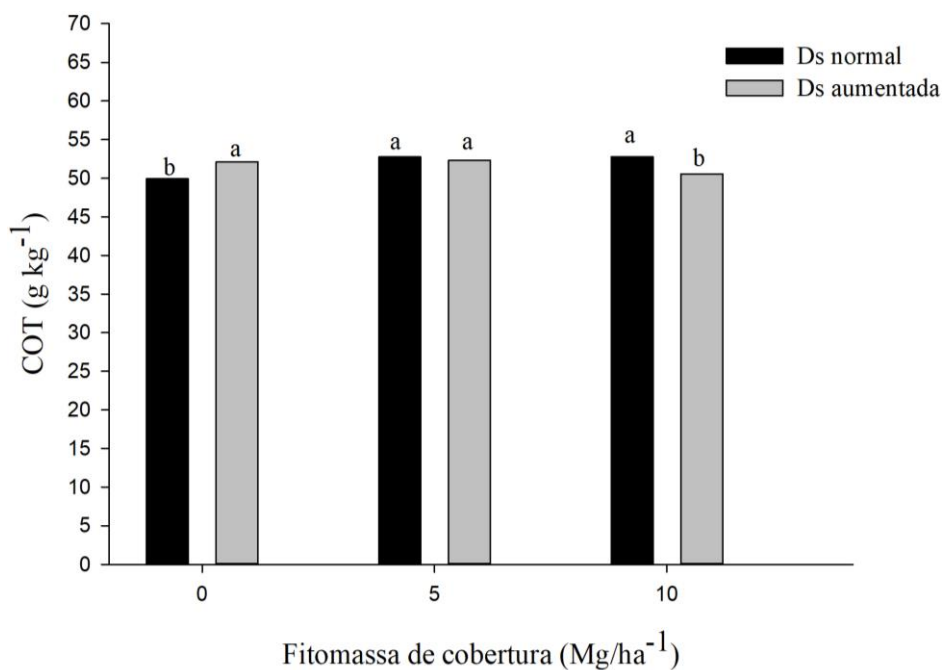


Fonte: Elaborada pela autora (2022)

Para o solo sem cobertura foi constatada diferença entre os tratamentos, o fator Ds aumentada incrementou o teor de COT, obtendo médias em torno de 52,1 g kg⁻¹, enquanto a Ds normal apresentou 49 g kg⁻¹ (Figura 12).

Para a adição de 5 Mg/ha⁻¹ de fitomassa de cobertura não foi observada diferença significativa entre os tratamentos, com valores médios de 52 g kg⁻¹. O comportamento para o tratamento com adição de 10 Mg/ha⁻¹ de fitomassa de cobertura se mostrou diferente, pois houve incremento de COT associado ao fator Ds normal do solo com média de 53 g kg⁻¹ de COT e a Ds aumentada reduziu o teor para 50 g kg⁻¹.

Figura 12 - Teor de Carbono orgânico total (COT) em Nitossolo Bruno em função da interação entre a fitomassa de cobertura e a Densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³).



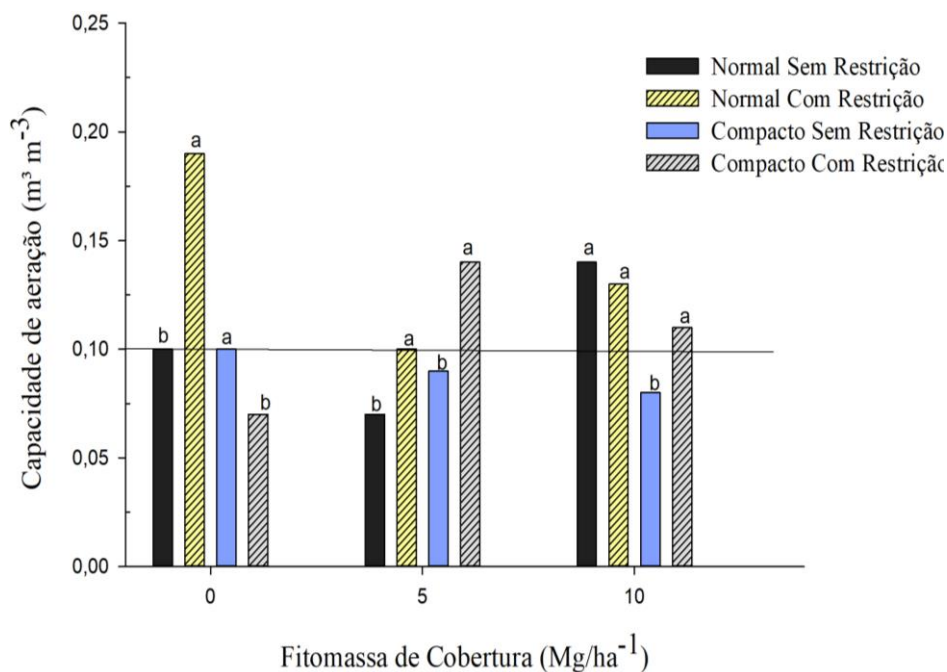
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (COT) Carbono orgânico total. Fonte: elaborado pela autora, 2022.

A cobertura do solo protege a superfície deste, contribuindo na disponibilidade de nutrientes e de carbono orgânico na camada superficial (ROTTERS., 2020). Portanto, a adição de 5 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura diferem com os resultados encontrados na literatura.

A capacidade de aeração (CA) não foi afetada pela restrição hídrica nos tratamentos com cobertura do solo (figura 13), ou seja, a CA diminuiu no solo descoberto, exceto para o tratamento não compactado com déficit hídrico que apresentou a maior CA dentro os resultados obtidos 0,19 m³ m⁻³.

Foi observada maior CA com a adição de 10 Mg ha⁻¹ destacando-se nos tratamentos com Ds do solo normal, mas não diferiu estatisticamente do solo compacto com restrição hídrica. Sem restrição hídrica a média foi de 0,14 m³ m⁻³ e com restrição passou para 0,13 m³ m⁻³. A adição de 5 Mg ha⁻¹ demonstrou que os tratamentos com restrição hídrica obtiveram melhor CA em relação aos sem restrição (Figura 13).

Figura 13 - Efeito da interação fitomassa de cobertura, densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) entre a restrição hídrica na Capacidade de aeração em Nitossolo Bruno.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

O aumento na densidade do solo provocou redução na CA nas doses de fitomassa de cobertura avaliadas. Klein et al. (2008) afirmam que entre as alterações ocasionadas pelo aumento da densidade do solo, uma delas é a redução na porosidade de aeração. Mas, quando o solo compactado passa por períodos restritivos ao fornecimento de água é evidenciado o efeito da cobertura do solo, que colabora para a manutenção da CA, enquanto no solo descoberto a CA foi reduzida. A cobertura vegetal promove melhorias na qualidade física do solo, pois resulta no incremento da matéria orgânica do solo, que por sua vez promove redução da compactação, bem como aumento da porosidade e maior estabilidade de agregados (ROSADO et al., 2012).

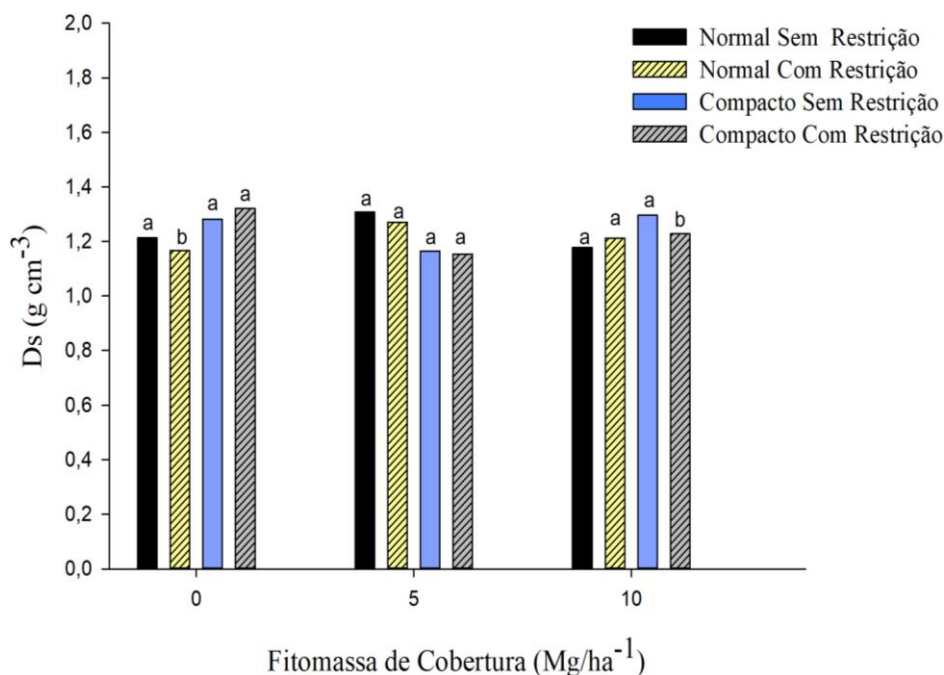
Em função da menor para a maior densidade Andognini et al., (2020) observaram que a CA reduz com aumento da densidade do solo e assim reflete na qualidade física do solo, pois a difusão de gases é de suma importância para que as raízes mantenham seu metabolismo aeróbico ativado. A capacidade de aeração aumentou, para este mesmo solo, em cultivo de hortaliças folhosas, em consequência do aumento da Ds do solo (SARI, 2021).

A manutenção da CA com o aumento da Ds do solo pode ser explicada pelo fato de que em solos argilosos, como este, em sua maioria têm boa estrutura, onde os microagregados proporcionam melhores condições físicas, principalmente aliados aos teores de MO elevado, mantendo porosidade efetiva mesmo em alto grau de compactação, por conta de a MO promover essa melhoria na agregação e estruturação do solo (CAMPOS et al., 1995).

A CA é a quantidade de macro e microporos no solo, se a microporosidade for maior o solo será mais adensado se tornando restritivo no limite de $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (WALKER et al., 2016).

A densidade é um atributo sensível ao manejo do solo, no entanto, não foi observado efeito do déficit hídrico para a cobertura de 5 Mg ha^{-1} de fitomassa. Para o tratamento coberto com 10 Mg ha^{-1} de fitomassa foi observada que a restrição hídrica também não afetou a Ds nos tratamentos sem compactação do solo. Embora, para os tratamentos com Ds aumentada o estresse hídrico reduziu a Ds do solo. Nos tratamentos sem o uso de cobertura, o déficit hídrico colaborou para a redução da Ds para os tratamentos que não foram compactados. A Ds do Nitossolo Bruno variou de $1,2$ a $1,3 \text{ g cm}^{-3}$ (Figura 14).

Figura 14 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura a densidade do solo normal ($1,0 \text{ g cm}^{-3}$) e aumentada ($1,3 \text{ g cm}^{-3}$) e restrição hídrica na Densidade em Nitossolo Bruno.



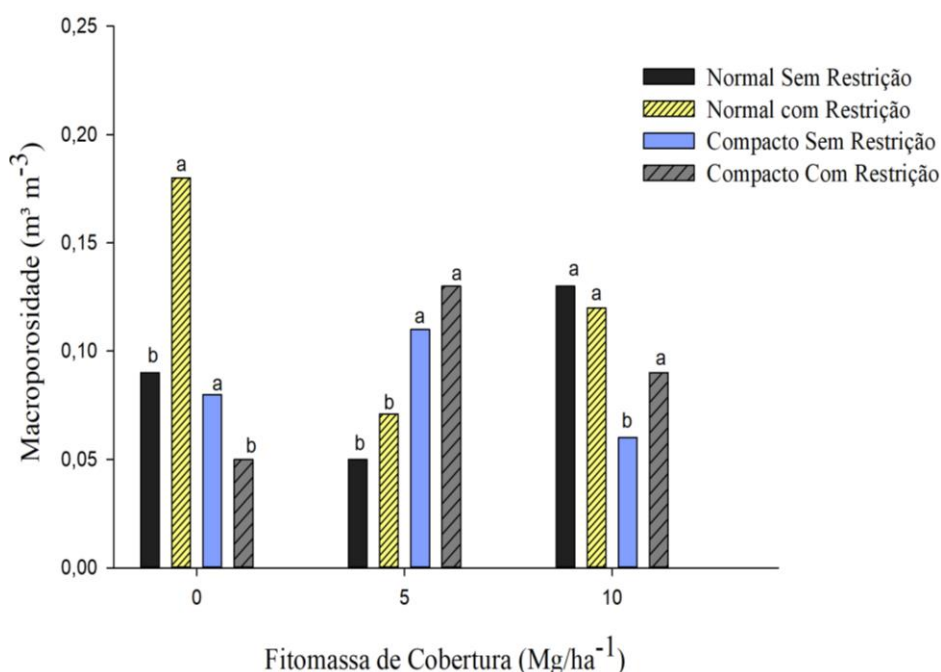
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

Foi observada aumento da Ds do Nitossolo Bruno estudado por Andognini et al. (2020), conforme o aumento no grau de compactação do solo, corroborando com o comportamento dos tratamentos com (10 Mg ha^{-1} de fitomassa) e sem (0 Mg ha^{-1} de fitomassa) cobertura do solo no presente estudo, onde os valores de Ds obtidos estão próximos ao grau de compactação de 95% com $1,26 \text{ g cm}^{-3}$ e grau de compactação de 100% com $1,32 \text{ g cm}^{-3}$. Enquanto, esse efeito foi atenuado pela cobertura do solo com dose de 5 Mg ha^{-1} de fitomassa onde a Ds foi menor

nos tratamentos com compactação em relação aos tratamentos com Ds normal, Silva; Rosolem, (2002) observaram efeito benéfico de espécies de cobertura na densidade do solo.

A macroporosidade seguiu o mesmo comportamento da CA para o solo descoberto e com 10 Mg/ha⁻¹ de fitomassa de cobertura. Para a adição de 5 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura a restrição hídrica não apresentou diferença entre os tratamentos, e o aumento da Ds proporcionou aumento na macroporosidade (Figura 15).

Figura 15 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura a densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) e restrição hídrica na Macroporosidade em Nitossolo Bruno.



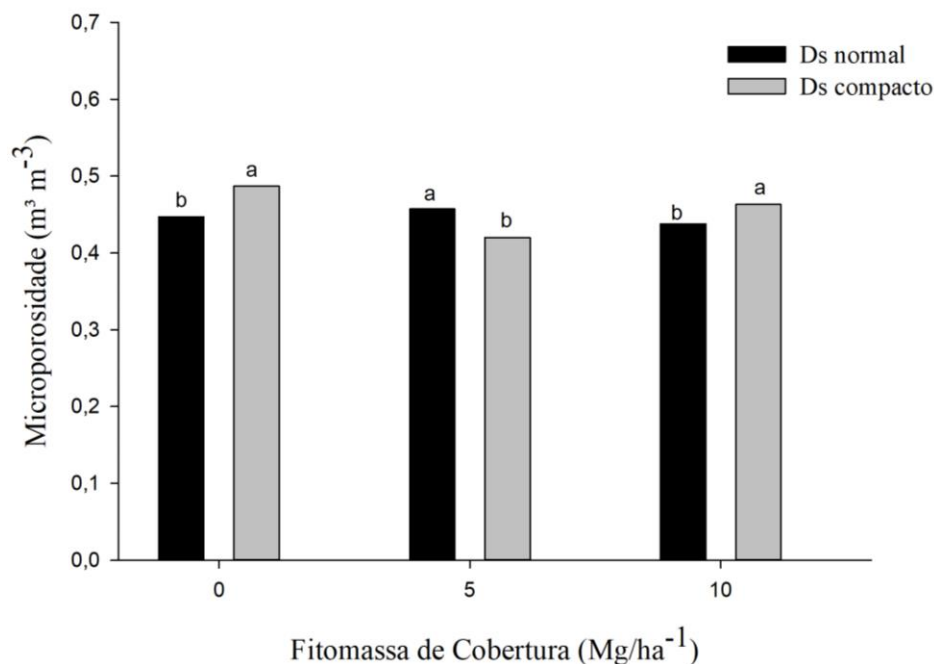
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

A macroporosidade possui relação direta com a porosidade de aeração, sendo que o baixo valor na porosidade de aeração indica redução dos macroporos e vice e versa (WATANABE et al., 2000). O uso e manejo do solo reduzem a porosidade total do solo, principalmente o volume de macroporos associada com o aumento da Ds (ROTTERS et al., 2020). Essa afirmação pode ser validada neste estudo, sendo observada nos tratamentos com e sem cobertura do solo (doses 0 e 10 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura).

A microporosidade aumentou de 0,44 para 0,50 m³ m⁻³ em decorrência ao aumento da Ds em solo descoberto. Esse mesmo comportamento foi observado para a adição de 10 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura. Para o tratamento com adição de 5 Mg ha⁻¹ foi observado o

comportamento inverso, a quantidade de microporos diminuiu com o aumento da Ds do solo (Figura 16).

Figura 16 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na Microporosidade em Nitossolo Bruno.



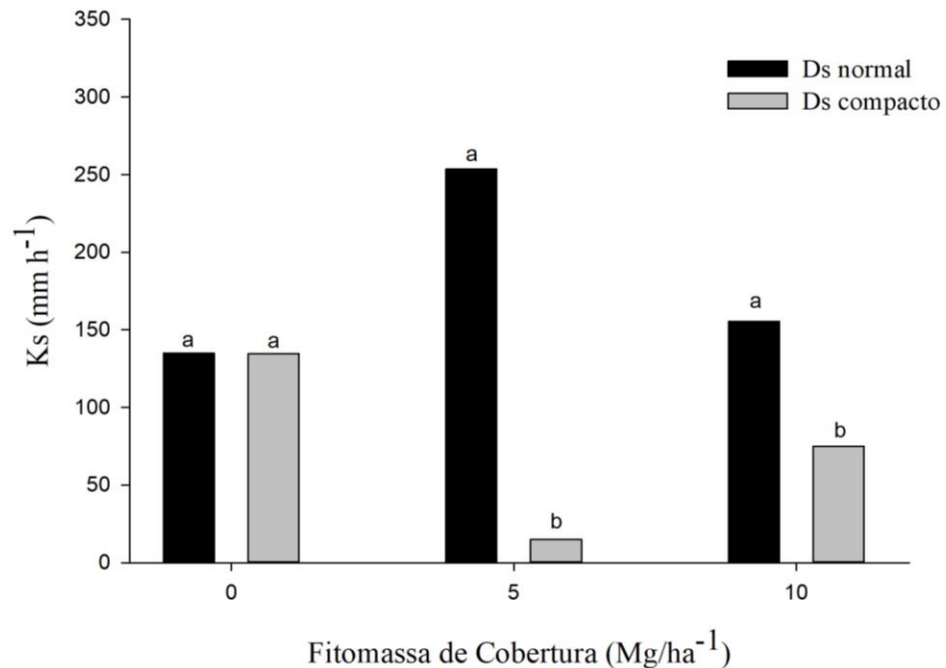
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

A compactação afeta primeiro os macroporos os quais por sofrerem expressiva deformação podem transformar-se em microporos (DIAS JUNIOR, 2000). Esse comportamento foi observado para os tratamentos com adição de 10 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura, e para o solo sem cobertura, enquanto a adição de 5 Mg ha⁻¹ obteve comportamento oposto.

Observou-se aumento no volume de microporos com o aumento da Ds do solo, comportamento também visto por Andognini et al., (2020) para Nitossolo em experimento conduzido em vasos.

Não houve diferença entre os tratamentos para a condutividade hidráulica saturada (Ks) em solo sem cobertura, as médias variaram entre 135 e 134 mm h⁻¹. A adição de 5 Mg ha⁻¹ proporcionou aumento na Ks em relação ao solo descoberto, média de 253,5 mm h⁻¹ para o solo sem compactação (Figura 17).

Figura 17 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na condutividade hidráulica saturada em Nitossolo Bruno.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

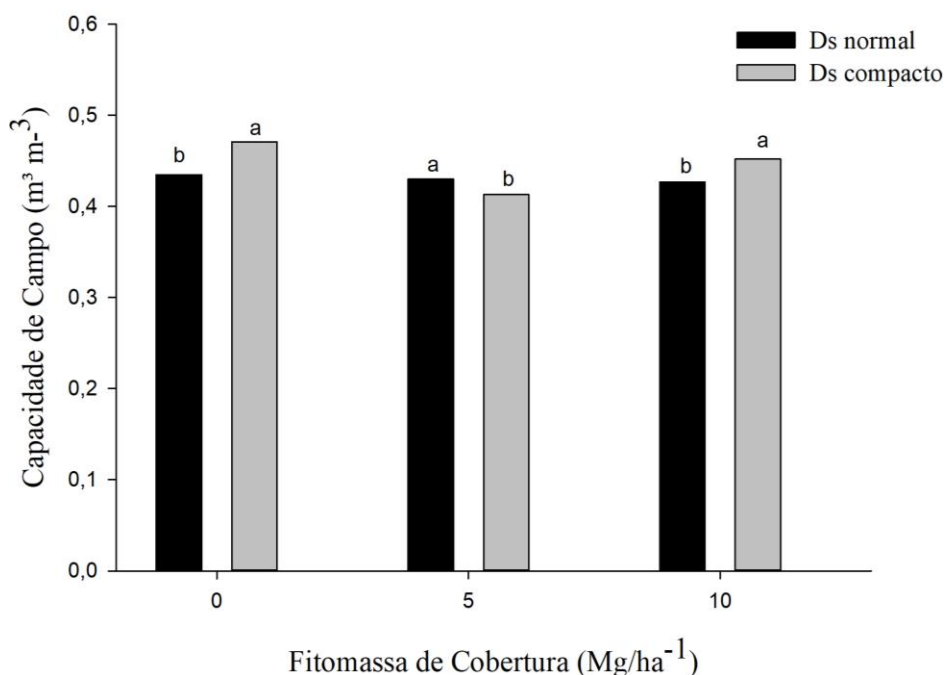
O aumento da Ds do solo reduziu a Ks, nos tratamentos com adição de fitomassa de cobertura. Os resultados obtidos indicam que o fluxo de água foi prejudicado devido a redução da Ks, mesma tendência foi observada por Andognini et al. (2020) com o aumento no grau de compactação do Nitossolo onde a Ks reduziu de 177 para 0,1 mm h⁻¹.

A cobertura do solo não conseguiu minimizar o efeito da compactação do solo na redução da condutividade hidráulica saturada. A fitomassa em cobertura do solo, consegue minimizar os efeitos das perdas de água por evaporação, na temperatura do solo, mas a condutividade da água é dependente da porosidade e da continuidade dos poros, fator alterado pelo manejo antropizado (ANDOGNINI et al., 2020).

A capacidade de campo (CC) demonstrou diferenças entre as doses de fitomassa de cobertura. Para as doses 0 e 10 Mg ha⁻¹ o aumento da Ds do solo proporcionou acréscimo na CC, enquanto para 5 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura o comportamento foi inverso, o aumento da Ds do solo resultou em redução da CC. Os valores de CC variaram de 0,41 a 0,47 m³ m⁻³. Com a aplicação de resíduo em cobertura do solo Sari (2021) observou uma variação da capacidade de campo para este mesmo solo, de 0,40 para 0,54 m³ m⁻³ em apenas um ciclo de cultivo de hortaliças. A maior capacidade de campo de um solo reflete em modificações na sua estrutura e no seu comportamento hídrico com o tempo e com os tratamentos.

A relação do aumento da capacidade de campo com a elevação da Ds do solo, pode ser atribuída pela redução da macroporosidade em solo compactado, esse fenômeno pode resultar em maior volume de microporos, o que aumentaria a capacidade de armazenar água (BERTOL; SANTOS, 1995). Associado à microporosidade a capacidade de campo reflete a porção de poros que retém água após a drenagem natural do solo (Figura 18).

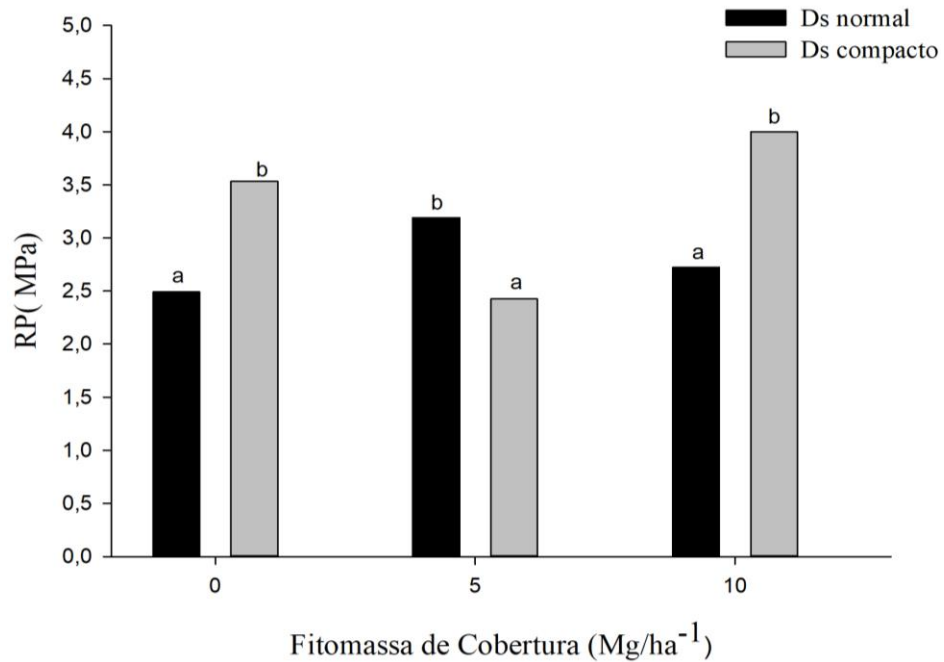
Figura 18 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na Capacidade de Campo em Nitossolo Bruno.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborada pela autora, 2022.

A resistência a penetração (RP) aumentou de acordo com a elevação da Ds do solo, porém esse comportamento não foi observado para o tratamento com adição de 5 Mg/ha⁻¹ de fitomassa de cobertura, onde a RP diminuiu com o aumento da Ds de 3,2 para 2,4 MPa. No solo descoberto o aumento foi 2,5 para 3,5 MPa, e com adição de 10 Mg/ha⁻¹ de fitomassa de cobertura a RP para Ds normal do solo foi de 2,7 MPa e com a elevação da Ds apresentou média de 4 Mpa (Figura 19).

Figura 19 - Efeito da interação entre a fitomassa de cobertura e densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na Resistência a Penetração em Nitossolo Bruno.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada dose de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

As médias obtidas de resistência a penetração neste experimento ficaram acima de 2,0 MPa que é o limite considerado crítico por alguns pesquisadores (LIMA et al., 2012; SILVA et al., 2008; TORMENA et al., 1999). A RP obtida para este solo foi maior em relação aos resultados para o Cambissolo, demonstrando que resistência a penetração, além de sofrer influência do teor de umidade é responsiva a textura do solo (ANDOGNINI et al., 2020).

A redução da RP em solo compactado observada no tratamento com adição de 5 Mg ha⁻¹ de fitomassa de cobertura, pode ser atribuída ao efeito da palhada em superfície. Braida et al. (2006) afirmam que quanto maior a quantidade de palha presente sobre o solo durante o ensaio Proctor, menores os valores obtidos para densidade do solo.

Não foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) para as variáveis físicas do solo porosidade total (PT), volume de criptoporos (Crip), água disponível (AD), água prontamente disponível (APD) e química carbono orgânico particulado (COP) (Anexo E).

6.2.1 Resposta da beterraba em Nitossolo Bruno

O teor de sólidos solúveis (°Brix) da beterraba na Ds do solo foi normal foi de 10,36 °Brix, e reduziu para 8,96 °Brix na Ds do solo aumentada (Tabela 7).

A eficiência do uso da água (EUA) da beterraba em Nitossolo bruno foi maior na densidade do solo aumentada, com valor de 246 ml/g e reduziu para 308 ml/g na Ds normal, o que indica maior gasto de água para produção de biomassa.

Tabela 7 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) na eficiência do uso da água e no teor de sólidos solúveis totais no cultivo de beterraba Boro em Nitossolo Bruno 80 dias após o transplante.

Densidade	EUA (ml/g)	°BRIX
Normal	307,79 b	10,36 a
Aumentada	246,06 a	8,96 b
CV (%)	25,7	13,1

Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (EUA) eficiência do uso da água; (°BRIX) teor de sólidos solúveis totais.

Fonte: elaborada pela autora, 2021.

A beterraba híbrida Merlot apresentou o teor de sólidos solúveis de 9,01°Brix cultivada em Latossolo vermelho, (COUTINHO; OLIVEIRA; ECHER, 2016). Próximo aos resultados obtidos para o híbrido Boro neste estudo. O °Brix oferece boa estimativa do conteúdo de açúcares no tecido vegetal, que se constitui em importante característica qualitativa para a beterraba. Assim, o teor de sólidos solúveis esteve numa média de 9,12 °BRIX para os cinco genótipos, avaliados em Cambissolo háplico na região do Alto Vale do Itajaí (DUARTE; HILLESHEIM; SCHEIDT, 2012). Para o híbrido Boro foi observado por Fruet et al. (2019) um teor de 8,08 °Brix.

A redução no teor de sólidos solúveis (Brix°) observada com o aumento da Ds do solo, pode estar associada a disponibilidade de água no solo, uma vez que a planta necessita de água para produção de fotoassimilados e açúcares. O aumento da Ds do solo proporcionou melhoria na EUA no cultivo da beterraba que pode estar ligado ao fato de que o manejo do solo, a retenção de água são influenciadas pela granulometria e constituição do solo, portanto, em solos argilosos e com alto teor de matéria orgânica a retenção de água é maior, pois as forças de adsorção dependem da espessura do filme de água que recobre as partículas, a qual varia de acordo com sua superfície específica (SILVA *et al.*, 2005).

O número de folhas, diâmetro de raiz, massa seca das folhas, área foliar (AF) e massa seca de raiz (MSR), teor de clorofila (SPAD), massa fresca de raiz (MFR) foram variáveis que não responderam aos tratamentos. As variáveis que foram submetidas a regressão linear, teor de clorofila (SPAD), massa fresca de raiz (MFR), teor de sólidos solúveis (BRIX°) não foram significativas ao modelo em nível de 5 %.

6.2.2 Resposta da alface em Nitossolo Bruno

O teor de clorofila foi superior para a Ds normal, com valor de 22% em relação a Ds aumentada, que reduziu para 18,6%. O conteúdo de clorofila é importante para expressar o potencial fotossintético das plantas, uma planta com alta concentração de clorofila é capaz de atingir taxas fotossintéticas mais elevadas. A alface consegue se adaptar as condições de menor energia radiante, pelo fato de que a intensidade da luz afetar diretamente o crescimento e desenvolvimento da planta (PINHEIRO et al., 2012).

O comprimento da raiz da alface foi superior para os tratamentos com Ds aumentada 17,6 cm enquanto a Ds normal apresentou uma média de 11,0 cm de comprimento de raiz (Tabela 8).

Tabela 8 - Efeito da densidade do solo normal (1,0 g cm³) e aumentada (1,3 g cm³) nas características produtivas da alface cv. Margareth cultivada em Nitossolo Bruno, 40 dias após transplante.

Densidade	SPAD (%)	CR (cm)	Alt (cm)	MF (g planta ⁻¹)
Normal	22,0 a	11,0 b	17 b	116,6 b
Aumentada	18,6 b	17,6 a	19 a	128,4 a
CV (%)	24,6	33,8	22,1	15,0

Médias seguidas de letras minúsculas na coluna diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). (SPAD) teor de clorofila; (CR) comprimento de raiz; (Alt) altura da parte aérea. Fonte: elaborado pela autora, 2021.

Algumas culturas podem mesmo em solos compactados, desenvolver o sistema radicular em função das especificidades de cada espécie (ROSOLEM et al., 2002). A alface assim como a planta de aveia possuem sistema radicular fasciculado que possibilita o desenvolvimento das raízes em pequenas fissuras e acabam explorando maior volume de solo (VALICHESKI et al., 2012).

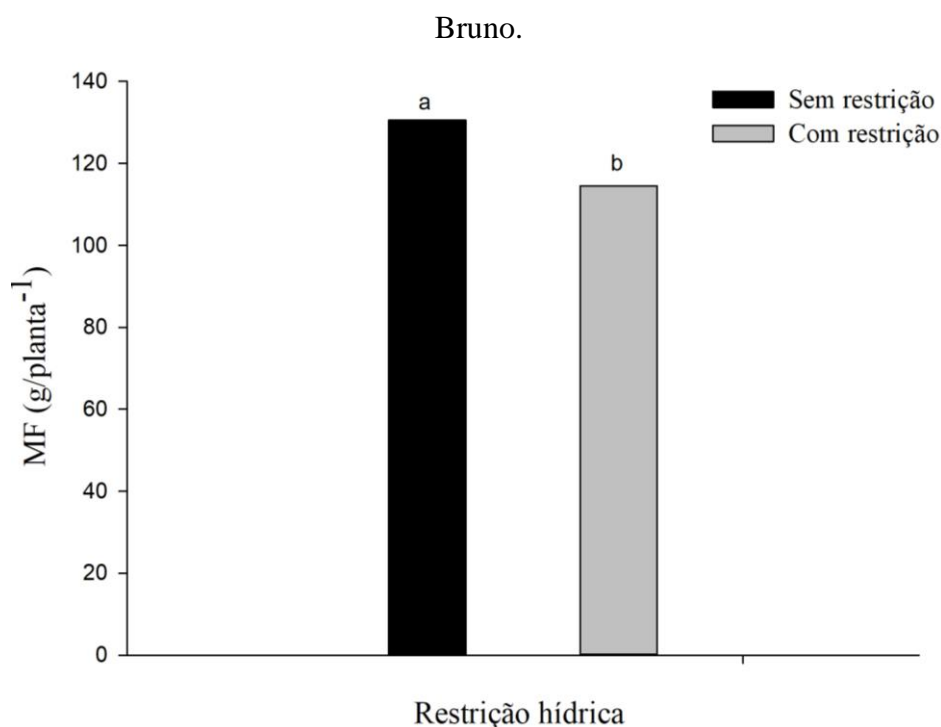
Após a morte e decomposição das raízes, o solo fica com uma quantidade maior de bioporos, nos quais ocorrem as trocas gasosas, o fluxo descendente de água e o crescimento das raízes das plantas subsequentes (WILLIAMS; WEIL, 2004; ABREU; REICHERT; REINERT, 2004). O fato de o comprimento da raiz da alface aumentar em função do aumento da Ds do solo pode ser atribuído ao sistema radicular fasciculado, ao déficit hídrico que provoca aprofundamento das raízes e ainda ao cultivo subsequente à beterraba.

Além disso, o crescimento da parte aérea das plantas assim como altura e massa fresca podem não sofrer os efeitos da compactação do solo pela ocasião de que essas plantas de

desenvolvem em condições adequadas de nutrientes e água (ATWELL, 1990; FOLONI; CALONEGO; LIMA, 2003; SILVA; ROSOLEM, 2002).

A massa fresca foi inferior no tratamento com restrição hídrica ($114,5 \text{ g/planta}^{-1}$) e para o tratamento que não sofreu estresse hídrico obteve média de $130,5 \text{ g/planta}^{-1}$ (Figura 20) demonstrando que a alface é uma planta sensível a falta de água.

Figura 20 - Efeito da restrição hídrica na produção da alface cv. Margareth em Nitossolo



Médias seguidas de letras minúsculas dentro da restrição hídrica diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

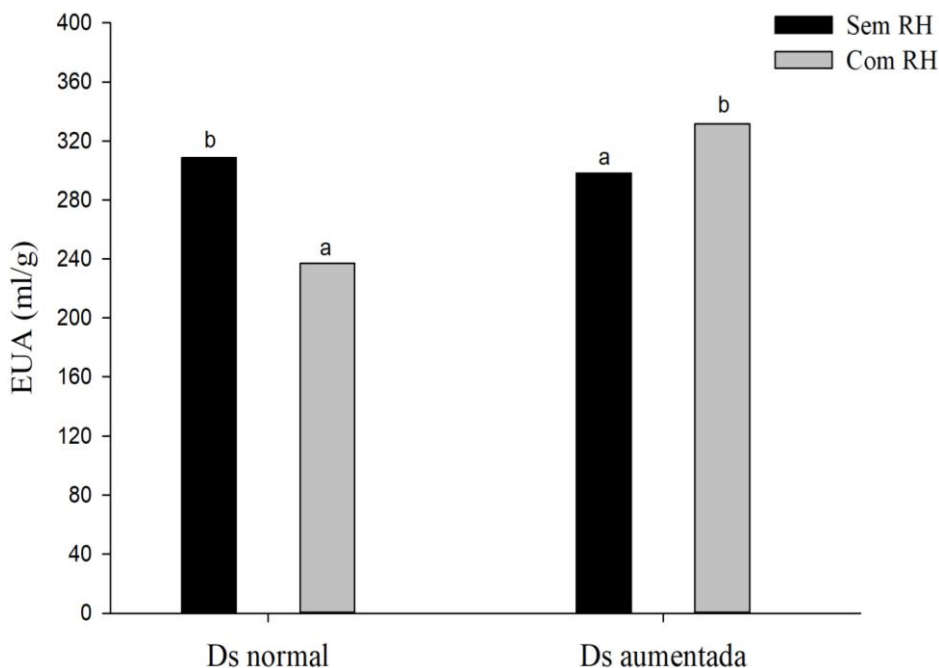
A restrição hídrica afeta os caracteres morfológicos da alface crespa, com diferenças entre as condições avaliadas com e sem restrição hídrica para as variáveis massa fresca e seca de parte aérea e raiz, número de folhas, comprimento de parte aérea (JÚNIOR; NETO, 2021). Para a alface lisa cultivada em ambiente protegido Dourado et al. (2014) observaram menor massa fresca das folhas com reposições de água inferiores a 100% da evapotranspiração. Paiva et al. (2005) justificaram isso por meio das relações hídricas na planta, pois o decréscimo de água no solo diminui o potencial de água na folha e sua condutância estomática, com fechamento estomático, que bloqueia o fluxo de CO_2 para as folhas e reduz o acúmulo de fotoassimilados.

Na figura 21, pode ser observado a influência da restrição hídrica na eficiência do uso da água, havendo diferença significativa ($p < 0,05$) entre os tratamentos. O manejo com restrição

hídrica associado a Ds normal do solo colaboram para o aumento da EUA, caso a Ds seja aumentada a EUA é reduzida. Portanto, em condições de Ds aumentada o déficit hídrico piora a EUA.

Figura 21 -Eficiência do uso da água em função da densidade do solo normal ($1,0 \text{ g cm}^3$) e aumentada ($1,3 \text{ g cm}^3$) sob os manejos com e sem restrição hídrica no cultivo da alface cv.

Margareth em Nitossolo Bruno.



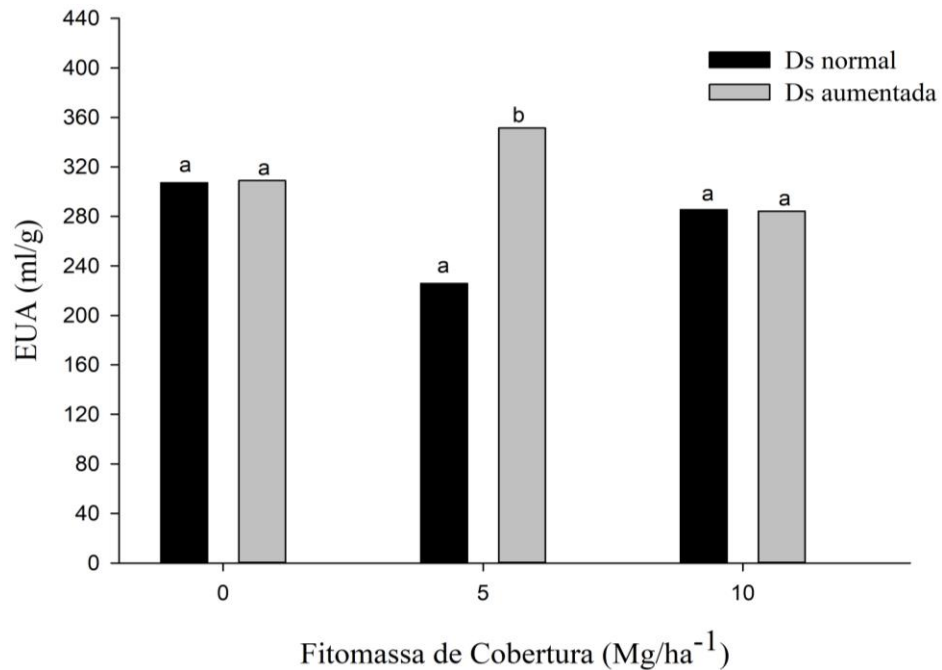
Médias seguidas de letras minúsculas dentro de cada densidade do solo diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$).

Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Portanto, em condições de Ds aumentada o déficit hídrico piora a EUA, esse efeito foi observado no cultivo do feijoeiro onde Hara et al., (2018) explica que em condição de forte restrição hídrica no solo, a eficiência da utilização da água é negativamente afetada pela densidade do solo. Por outro lado, em condição de Ds normal, a restrição hídrica proporcionou melhoria na EUA. Onde não há efeito da compactação, há maior disponibilidade de água relacionada a macroporosidade que não sofre alterações contribuindo para o fluxo de água no solo (SILVA; ALBUQUERQUE; COSTA, 2014).

A influência da fitomassa de cobertura na eficiência do uso da água foi observada apenas para o tratamento com adição de 5 Mg ha^{-1} de fitomassa, demonstrando diferença significativa entre as densidades do solo. A EUA foi maior associada a Ds normal, o aumento da Ds provocou menor EUA (Figura 22). Nos demais tratamentos não houve diferença significativa ($p < 0,05$).

Figura 22 - Eficiência do uso da água em função da densidade do solo normal ($1,0 \text{ g cm}^3$) e aumentada ($1,3 \text{ g cm}^3$) sob os manejos com e sem adição de fitomassa de cobertura no cultivo da alface c.v Margareth em Nitossolo Bruno.



Médias seguidas de letras minúsculas dentro das doses de fitomassa de cobertura diferem pelo Teste de Tukey ($p \geq 0,05$). Fonte: elaborado pela autora, 2022.

Em termos numéricos a EUA foi de 225,8 ml/g para Ds normal, e 351,4 ml/g para Ds aumentada. Em solo descoberto variou de 307 a 309 ml/g. Em solo com cobertura de 10 Mg/ha^{-1} de fitomassa a EUA variou entre 285 e 284 ml/g, demonstrando que mesmo não havendo significância entre os tratamentos é evidenciado que a cobertura do solo é capaz de melhorar a EUA. Foi notada redução de 59,5% da EUA em Nitossolo Vermelho com a elevação da Ds (HARA et al., 2018), efeito semelhante observado para o tratamento com adição de 5 Mg/ha^{-1} de fitomassa, onde a Ds elevada reduziu a EUA.

O uso de cobertura auxilia na redução da evaporação do solo e conseqüentemente, minimiza o consumo de água provocando aumento da eficiência do uso da água (MENDONÇA; BERÇA; SOUZA, 2019), portanto a dose de 5 Mg/ha^{-1} de fitomassa melhorou a EUA.

As variáveis eficiência do uso da água (EUA), teor de clorofila (SPAD), massa seca (MS), massa fresca (MF), área foliar (AF), número de folhas (NF), altura da parte aérea (AP) não responderam à variação da fitomassa de cobertura sobre o solo.

7 CONCLUSÕES

A utilização da fitomassa em cobertura melhora a eficiência do uso da água no cultivo da alface em Cambissolo Húmico. A dose de 5 Mg ha⁻¹ associada a Ds aumentada do solo aumentam a EUA para a cultura em Nitossolo Bruno.

A EUA da beterraba melhora com o aumento da densidade nos diferentes solos. A restrição hídrica mostrou ser um manejo que não contribui para o uso eficiente da água para a cultura.

A restrição hídrica provoca decréscimo nas características produtivas da beterraba e da alface no cultivo em Cambissolo Húmico e reduz a massa fresca e o número de folhas de alface em Nitossolo Bruno.

O aumento na densidade do solo provoca diminuição de parâmetros físicos do solo considerados essenciais para o bom desenvolvimento das plantas, como Ks, PT, CA e ADP.

A fitomassa de cobertura não incrementa o teor de carbono orgânico nos diferentes solos, após dois ciclos de cultivo de hortaliças.

REFERÊNCIAS

- ABREU, S. L.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em argissolo granco-arenoso sob plantio direto. **R. Bras. Ci. Solo**, 2004.
- ALLEN, R. G. et al. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-**FAO Irrigation and drainage paper 56**. 1998.
- ALMEIDA, J. A. et al. Chemical, physical and mineralogical attributes of soils derived from sedimentary rocks of the Planalto of Lages-SC, Brazil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, n. 3, 2019.
- ANDOGNINI, J. et al. Soil compaction effect on black oat yield in Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, p. 1–16, 2020.
- ANDRADE, J. G. DE. Perdas de água por evaporação de um solo cultivado com milho nos sistemas de plantio direto e convencional. Dissertação de mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação e Morfogênese do solo. Universidade Federal de Santa Maria, p. 93, 2008.
- ATWELL, B. J. The effect of soil compaction on wheat during early tillering: I. Growth, development and root structure. **New Phytologist**, v. 115, n. 1, p. 29–35, 1990.
- BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.39 n. 7, p. 677–683, 2004.
- BELL, J. M. et al. Effects of irrigation level and timing on profile soil water use by grain sorghum. **Agricultural Water Management**, v. 232, p. 106030, 2020.
- BELTRAME L.F.S. et al. Estrutura e compactação na permeabilidade de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.5, n. 3, p. 145-149. 1981.
- BERÇA, A. S. et al. Efeito da cobertura morta no solo sobre o manejo da irrigação por gotejamento no cultivo de repolho. **III INOVAGRI International Meeting**, v. 3, p. 2015, 2015.
- BERTOL, I. et al. Perdas de fósforo e potássio por erosão hídrica em um inceptisol sob chuva natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 485–494, 2004.
- BERTOL, I.; SANTOS, J. C. P. Uso Do Solo E Propriedades Físico- Hidricas Planalto Catarinense. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 263–267, 1995.
- BERTOLLO, A. M.; LEVIEN, R. Compactação do solo em Sistema de Plantio Direto na palha. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 25, n. 3, p. 208–218, 2019.
- BEUTLER, A. N. et al. Densidade relativa ótima de latossolos vermelhos para a produtividade de soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p 843-849, 2005.
- BIANCHI, L.; GERMINO, G.; SILVA, M. DE A. Adaptação Das Plantas Ao Déficit Hídrico. **Acta Iguazu**, v. 5, n. 4, p. 15–32, 2016.

BLAINSKI, É. et al. Qunatificação da degradação física do solo por meio da curva de resistência no solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, p. 975–983, 2008.

BLUM, A. Drought Stress and its Impact. Disponível em: http://www.plantstress.com/Articles/drought_i/drought_i.htm#Repercussions. Acesso em: 15de abril de 2022.

BOEIRA, J. M. Propriedades físico-mecânicas de um cambissolo húmico e de um nitossolo bruno sob condições naturais Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina v. 3, n. 2017, p. 54–67, 2020.

BRADY, N. C.; WEILL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 15. ed. 2013.

BRAIDA, J. A. et al. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 30, p. 605–614, 2006.

BRAIDA, J. A. et al. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 131–139, 2010.

BREGONCI, I. D. S. et al. Desenvolvimento do sistema radicular do rabanete em condição de estresse hídrico. **Idesia (Arica)**, v. 26, n. 1, p. 33–38, 2008.

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Participate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Sci. Soc**, v. 56, p. 777–783, 1992.

CAMPOS, B. C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho - Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.121-126, 1995.

CANUTO, C. et al. Biochar e esterco bovino aumentam a eficiência no uso de água da alface. **Diversitas Journal**, v. 4, n. 3, p. 1082–1091, 2019.

CARVALHO, J. E. DE et al. Cobertura morta do solo no cultivo de alface Cv. Regina 2000, em JI-Paraná/RO. **Ciênc. agrotec., Lavras**, v. 29, n. 5, p. 935–939, 2005.

CASTRO, O. M. DE; VIEIRA, S. R.; SIQUEIRA, G. M. Atributos físico-hídrico de um Latossolo Vermelho eutroferrico sob diferentes sistemas de manejo. **Bragantia, Campinas**, v. 69, n. 2, p. 433–443, 2010.

CEAGESP. **Beterraba Guia de identificação**. 2021.

COMAS, L. H. et al. Water productivity under strategic growth stage-based deficit irrigation in maize. **Agricultural Water Management**, v. 212, p. 433–440, 2019.

CORREA, C. V.; CARDOSO, A. I. I. Competição de variedades e híbridos de beterraba. **Revista cultivando o saber**, v. 10, p. 13–20, 2017.

COSTA, A. et al. Pedotransfer functions to estimate retentions and availability of water in soils

of the state of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 889–910, 2013.

COUTINHO, P. W. R.; OLIVEIRA, P. S. R. DE; ECHER, M. DE M. Características produtivas e qualitativas de cultivares de beterraba. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. p. 62, 2016.

DE SOUZA, A. P. et al. Evapotranspiração, coeficientes de cultivo e eficiência do uso da água da cultura do pimentão em diferentes sistemas de cultivo. **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 33, n. 1, p. 15–22, 2011.

Dias Júnior, M. S. Compactação do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Schaefer, C. E. G. R., (ed.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.55-94, 2000.

DORTZBACH, D. et al. Compartimentos da matéria orgânica do solo em vinhedos altomontanos de Santa Catarina. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 10677–10691, 2020.

DOURADO, L. G. A. et al. Reposição de água na cultura da alface lisa com a utilização do irrigas em ambiente protegido. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 10, n. 18, p. 26–33, 2014.

DUARTE, A. L. M. Efeito da água sobre o crescimento e o valor nutritivo das plantas forrageiras. **Pesquisa & Tecnologia**, v. 9, n. 2, 2012.

DUARTE, R. L. R. et al. Avaliação de cultivares de alface nos períodos seco e chuvoso em teresina PI. **EMBRAPA UEPAE de Teresina**. n. 53, p. 1-8, 1992.

DUARTE, S.; HILLESHEIM, P. C.; SCHEIDT, B. T. Estudo comparativo de genótipos de beterraba cultivados na primavera / verão no Alto Vale do Itajaí, SC. **Horticultura Brasileira**, v. 30, n. 2, p. 2957–2963, 2012.

EMBRAPA. Solos do Estado de Santa Catarina: Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, **Empresa de pesquisa agropecuária**.v. 46, p. 745, 2004.

FÁTIMA, R. T. DE et al. Crescimento E Trocas Gasosas Em Alface Cultivada Sob Regimes Hídricos E Adubação Fosfatada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, p. 861p., 2018.

FHECHA, 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 em Agronomia). Escola Superior de Agricultura de Luiz de Queiroz, 2004.

FILGUEIRA, F. A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3 ed. Rec. Ampl. Viçosa: UFV, 2008.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. DE. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 38, n. 8, p. 947–953, 2003.

FREIRE, L. R. et al. **Manual de calagem e adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Editora Universidade Rural, p.430, 2013.

FRIZZONE, J. A. Planejamento da Irrigação com Uso de Técnicas de Otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**. v. 1, n. 1, p. 24-49, 2007.

FRUET, D. L. et al. Desempenho da beterraba sob diferentes lâminas de irrigação e doses de pó de rocha adicionadas ao solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 9620–9627, 2019.

GUBIANI, P. I. et al. Tensão e extração de água em mesa de tensão e coluna de areia, em dois solos com elevada densidade. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 39, n. 8, p. 2535–2538, 2009.

GUBIANI, P. I. et al. Falling head permeameter and software to determine the hydraulic conductivity of saturated soil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 34, n. 3, p. 993–997, 2010.

HAMADA, E.; TESTEZLAF, R. Desenvolvimento e produtividade da alface submetida a diferentes lâminas de água através da irrigação por gotejamento. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 30, n. 9, p. 1201–1209, 1 set. 1995.

HARA, A. T. et al. Eficiência relativa de utilização da água pela cultura do feijoeiro em diferentes condições de umidade e densidade do solo. **Revista Scientia Agraria**, v. 19, n. 2, p. 154–163, 2018.

JACCOUD, A.; CASTRO, A. F. DE. Curvas de caracterização de umidade de solos da área da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, município de Itaguaí. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 11, n. 12, p. 1–9, 1976.

JÚNIOR, S. A. U.; NETO, S. S. DE O. Respostas Morfológicas De Cultivares De Alface Sob Deficiência Hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 15, n. 3, p. 351–366, 2021.

KLEIN, V. A. et al. Porosidade de aeração de um Latossolo Vermelho e rendimento de trigo em plantio direto escarificado. **Ciência Rural, Santa Maria**, v. 38, p. 365-371, 2008.

LEÃO, T. P. **Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo da pastagem**. Dissertação (Mestrado em Solos e nutrição de plantas). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2002.

LI, X. et al. Deficit irrigation provokes more pronounced responses of maize photosynthesis and water productivity to elevated CO₂. **Agricultural Water Management**, v. 195, p. 71–83, 1 jan. 2018.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo, EDUSP, 2005. 335 p.

LIMA, C. L. R. DE et al. Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 124 p. 190-195, 2012.

LIMA, L. R. et al. Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.

22, n. 2, p. 113–118, 2018.

LIMA, M. E. DE. **Avaliação do desempenho da cultura da alface (*Lactuca sativa*) cultivada em sistemas orgânico de produção, sob diferentes lâminas de irrigação.** Dissertação de mestrado apresentada ao curso de Pós-graduação em Fitotecnia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. p. 77, 2007.

LOPES, S. G. et al. Manejos de irrigação e doses de nitrogênio em beterraba. **Revista Agrogeoambiental**, v. 8, n. 3, p. 25–39, 2015.

LOSS, A. et al. Atributos físicos do solo em cultivo de cebola sob sistemas de plantio direto e preparo convencional em cultivo de cebola. **Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas**. v. 11, n. 1, p. 105-113, 2017.

LOSS, A. et al. Carbono orgânico total e agregação do solo em sistema de plantio direto agroecológico e convencional de cebola. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1212–1224, 2015.

LOSS, A. et al. Carbono, matéria orgânica leve e frações oxidáveis do carbono orgânico sob diferentes sistemas de produção orgânica. **Comunicata Scientiae**, v. 1, n. 1, p. 57–64, 2019.

MAFRA, Á. L. et al. Iniciando o sistema de plantio direto de hortaliças: Adequações do solo e práticas de cultivo. In: FAYAD, J. A.; ARL, V.; COMIM, J. J.; MAFRA, A. L.; MARCHESI, D. R. **Sistema de plantio direto de hortaliças**. Florianópolis: Expressão Popular, 2019. p. 215-226.

MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. DE C.; SILVA, H. R. DA. Manejo da irrigação em hortaliças. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Centro Nacional de Pesquisa de Hortaliças - Brasília: EMBRAPA-SPI**, v. 5º edição, p. 72p., 1996.

MEDICI, L. O. et al. What about keeping plants well watered? **Environmental and Experimental Botany**, v. 99, p. 38–42, mar. 2014.

MELLO, N. A. DE. **Efeito do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo.** Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MENDONÇA, T. G.; BERÇA, A. S.; SOUZA, C. F. Uso da água em tomateiro cultivado com cobertura morta em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 13, n. 1, p. 3236–3246, 22 abr. 2019.

MIRANDA, F. R. DE et al. Eficiência Do Uso Da Água Na Irrigação Do Coqueiro Anão. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 109–124, 2019.

NALIN, D. et al. Aplicação de diferentes lâminas de irrigação na cultura da rúcula (*Eruca sativa*) em cultivo protegido. **27º Encontro Anual de Iniciação Científica**. Universidade Estadual de Maringá PR, 2018.

NEPOMUCENO, A. L.; NEUMAIER, N.; FARIAS, J. R. B.; OYA, T. Tolerância à seca em plantas. **Biotechnology Ciência e Desenvolvimento**, v. 23, p. 12-8, 2001

O'NEILL, P. M.; SHANAHAN, J. F.; SCHEPERS, J. S. Use of Chlorophyll Fluorescence Assessments to Differentiate Corn Hybrid Response To Variable Water Conditions. **Crop Science**, v. 46, n. 2, p. 681–687, 1 mar. 2006.

OHSE, S. et al. Composição centesimal e teor de nitrato em cinco cultivares de alface produzidas sob cultivo hidropônico. **Bragantia**, v. 68, n. 2, p. 407–414, 2009.

OLIVEIRA, R. A. DE et al. Decomposição e Liberação de Nutriente da Matéria Seca de Plantas de Cobertura e Alteração na Produção da Cebola em Sistema de Plantio. **XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**, n. 1, p. 1–4, 2013.

OWUOR, S. O. et al. Conversion of natural forest results in a significant degradation of soil hydraulic properties in the highlands of Kenya. **Soil and Tillage Research**, v. 176, p. 36–44, 1 mar. 2018.

PAIVA, A. S. et al. Condutância estomática em folhas de feijoeiro submetido a diferentes regimes de irrigação. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 161–169, abr. 2005.

PEREIRA, L. S.; CORDERY, I.; IACOVIDES, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v. 108, p. 39–51, 15 maio 2012.

PIMENTEL, C. Metabolismo de carbono na agricultura tropical. Seropédica: Edur, 1998.

PINHEIRO, A.; TEIXEIRA, L. P.; KAUFMANN, V. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Revista Ambiente e Agua**, v. 9, n. 3, p. 445–458, 2014.

PUIATTI, M.; FINGER, F.L. **Cultura da beterraba**. In: FONTES, P.C.R. Olericultura: teoria e prática. Suprema Grafia e Editora: Viçosa, 2009. p.345-354.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, p. 131–146, 2002.

RICHARD, G. et al. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. **Journal of Soil Science**, v. 52, p. 49–58, 2001.

ROSADO, T. L. et al. Efeito da cobertura vegetal nos atributos físicos de um Latossolo Amarelo cultivado com banana. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**, v. 8, n. 15, p. 721, 2012.

ROSOLEM, C. A. et al. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 5, p. 821–828, 1999.

ROTTERS., D. F. **Atributos do solo em sistema de plantio direto de hortaliças em campo e casa de vegetação**. Tese apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Ciência do Solo. Universidade do Estado de Santa Catarina, 2020.

ROTTERS, D. F. et al. Carbon increase and soil physical improvement in an onion no-tillage system. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 16, n. 2, p. 1–8, 2021.

SANTOS, A. P. DOS et al. Perdas de fósforo por erosão hídrica no cultivo de cebola. **Terra –**

Habitats Urbanos e Rurais. Ituiutaba: Barlavento, 2019. 2.861 p.

SANTOS, G. G. et al. Qualidade física do solo sob sistemas de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1339–1348, 2011.

SARI, G. M. S. **Atributos físicos e matéria orgânica do solo após reciclagem de resíduo orgânico doméstico.** Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo. Univerdade do Estado de Santa Catarina, 2020.

SEQUINATTO, L. et al. Qualidade de um Argissolo submetido a práticas de manejo recuperadoras de sua estrutura física. **Revista brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 344–350, 2014.

SEXTON, P.; CARROLL, J. Comparison of SPAD chlorophyll meter readings vs. Petiole nitrate concentration in sugarbeet. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, n. 9, p. 1975–1986, 2002.

SGARBIERI, V.C. **Alimentação e Nutrição:** fator de saúde e desenvolvimento. 1.ed. Campinas: UNICAMP, 1987. 387p.

SILVA, A. O. DA; SILVA, Ê. F. D. F. E.; KLAR, A. E. Eficiência de uso da água em cultivares de beterraba submetidas a diferentes tensões da água no solo. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, p. 27–36, 2013.

SILVA, Á. P. DA et al. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo a penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1-10, 2008.

SILVA, F. B. DA et al. Teor de sólidos solúveis totais e intensidade de verde no desenvolvimento da beterraba em função de lâminas de água e níveis de salinidade. **XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, n. 31, p. 1550–1555, 2015.

SILVA, F. R. DA; ALBUQUERQUE, J. A.; COSTA, A. DA. Crescimento inicial da cultura dasoja em Latossolo Bruno com diferentes graus de compactação. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 38, p. 1731–1739, 2014.

SILVA, J. R. I. et al. Inter-relação de técnica de manejo de água e solo aplicadas a cultura do milho: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. 1–27, 2020.

SILVA, M. A. S. DA et al. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 3, p. 544–552, 2005.

SILVA, O.A.; SILVA, F.F.E & KLAR E.A; Water Resources and Irrigation Management. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB v.2, n.1, p.27-36, Jan.-Apr., 2013.

SILVA, R. H. DA; ROSOLEM, C. A. Crescimento radicular de soja em razão da sucessão de cultivos e da compactação do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 855–860, 2002.

SILVA, V. D. DA; QUEIROZ, S. O. P. DE. Manejo de água para produção de alface em ambiente protegido. **Irriga**, v. 18, n. 1, p. 184–199, 2013.

SIMÃO, S. Irrigação de alface. **Anais da E. S. A. Luiz de Queiroz**, 1955.

SINCLAIR, T. R. et al. Limited-transpiration response to high vapor pressure deficit in crop species. **Plant Science**, v. 260, p. 109–118, 1 jul. 2017.

SINGELS, A.; DONALDSON, R. A.; SMIT, M. A. Improving biomass production and partitioning in sugarcane: Theory and practice. **Field Crops Research**, v. 92, n. 2- 3 SPEC. ISS., p. 291–303, 2005.

SORACCO, C. G. et al. Contribution of macroporosity to water flux of a soil under different tillage systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 4, p. 1149–1156, 2012.

SOUZA, A. L. V.; SOUZA, A. L. V.; PEREIRA, F. A. C. Velocidade de infiltração básica como indicador da conservação do solo. **Terra – Habitats Urbanos e Rurais/ Ituiutaba: Barlavento**, p. 861, 2019.

SOUZA, A. P. DE et al. Taxas De Decomposição De Resíduos Vegetais Submetidos a Lâminas De Irrigação. **Irriga**, v. 19, n. 3, p. 512, 2014.

SOUZA, M. P. DOS S. et al. Crescimento, fisiologia e compostos voláteis de cebolinha em resposta a diferentes níveis de restrição hídrica. **Revista cultura agrônômica**, v. v.30, p. p.1-13, 2021.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 12, p. 1301–1309, 2013.

STONE, L. F. Eficiência do Uso da Água na Cultura do Arroz Irrigado. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Arroz e feijão**, v. 21 ed., p. 48, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre, Artmed, 2009. 849p.

TEÓFILO, T. M. . et al. Eficiência no uso da água e interferencia de plantas daninhas no meloeiro cultivado nos sistemas de plantio direto e convencional. **Planta Daninha, Viçosa-MG**, v. 30, n. 3, p. 547–556, 2012.

TIVELLI, S. W. et al. Beterraba: Do Plantio À Comercialização. **Boletim Técnico IAC, Campinas**, v. 32, n. 4, p. 1–51, 2011.

TOPAK, R.; SÜHERI, S.; ACAR, B. Effect of different drip irrigation regimes on sugar beet (*Beta vulgaris L.*) yield, quality and water use efficiency in Middle Anatolian, Turkey. **Irrig Sci**, p. 79–89, 2011

TORMENA, C. A. et al. Intervalo ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 3, p. 286–292, 1999.

UNKOVICH, M.; BALDOCK, J.; FARQUHARSON, R. Field measurements of bare soil evaporation and crop transpiration, and transpiration efficiency, for rainfed grain crops in Australia – A review. **Agricultural Water Management**, v. 205, p. 72–80, 30 jun. 2018.

VALICHESKI, R. R. et al. Desenvolvimento de plantas de cobertura e produtividade da soja conforme atributos físicos em solo compactado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**

e **Ambiental - Agriambi**, v. 16, n. 9, p. 969–977, 2012.

VIEIRA, G. H. S. et al. Indicadores morfo-fisiológicos do estresse hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em função de lâminas de irrigação. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 3 SUPPL. 1, p. 65–75, 2014.

WALKER, T. E. et al. **Efeito da integração lavoura e pecuária sob plantio direto e floresta cultivada em alguns atributos físicos do solo**. XXIV Seminário de Iniciação Científica Unijuí. Anais, 2016.

WATANABE, S. H. et al. Resistência do solo à penetração e porosidade de aeração de um latossolo vermelho distrófico sob plantio direto por dois anos. **Acta Scientiarum**. Agronomy, v. 22, n. 0, p. 1055–1060, 8 maio 2000.

WILLIAMS, S.M. & WEIL, R.R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 68:1403-1409. 2004

ANEXOS

ANEXO A – Resultado da análise de variância para efeito simples Cobertura, Densidade E Restrição Hídrica (C, Ds, RH) a 5 % de significância ($p > 0,05$), sobre os atributos físicos e químico do Cambissolo Húmico.

Atributos Físicos	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
Ksat	0,010	<0,001	0,283
RP	0,586	0,019	0,790
PT	0,073	<0,001	0,979
Ds	<0,001	<0,001	<0,001
Micro	0,848	0,001	0,294
Macro	0,145	<0,001	0,570
Criptoporos	0,555	<0,001	0,817
CA	0,100	<0,001	0,677
AD	0,903	0,138	0,511
APD	0,015	0,001	0,058

CC	0,790	0,003	0,464
PMP	0,555	<0,001	0,817
Atributos Químicos	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
COT	0,291	0,045	0,725
COP	0,343	0,189	0,070
COam	0,193	0,135	0,190

ANEXO B - Resultado da análise de variância para Interação Cobertura x Densidade, Cobertura x Restrição Hídrica, Densidade x Restrição Hídrica, Cobertura x Densidade x Restrição Hídrica (CxDs, CxRH, DsxRH, CxDsxRH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre os atributos físicos e químico do Cambissolo Húmico.

Atributos Físicos	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
Ksat	0,006	0,405	0,377	0,231
RP	<0,001	0,121	0,406	0,164
PT	0,566	0,450	0,979	0,744
Ds	<0,001	<0,001	<0,001	0,009
Micro	0,071	0,564	0,514	0,133
Macro	0,096	0,478	0,698	0,308
Criptoporos	0,395	0,684	0,443	0,337
CA	0,144	0,536	0,656	0,235
AD	0,679	0,504	0,996	0,605
APD	0,221	0,157	0,682	0,191
CC	0,181	0,712	0,482	0,130
PMP	0,395	0,684	0,443	0,337
Atributos Químicos	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
COT	0,927	0,809	0,204	0,388
COP	0,011	0,614	0,792	0,354
COam	0,130	0,773	0,224	0,169

ANEXO C – Resultado da análise de variância para efeito simples de Cobertura, Densidade E Restrição Hídrica (C, Ds, RH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre as características produtivas da Beterraba e Alface em Cambissolo Húmico.

Beterraba	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
EUA	0,865	0,008	0,002
SPAD	0,165	0,034	0,113
NF	0,947	0,099	0,858
MFR	0,929	0,595	0,025
AF	0,039	0,562	0,074
BRIX	0,715	0,676	0,774
MSF	0,261	0,940	0,286

DR	0,595	0,845	0,124
MSR	0,159	0,738	0,037
MST	0,657	0,775	0,046
Alface	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
EUA	<0,001	0,164	0,002
SPAD	0,335	0,008	0,865
NF	0,365	0,315	<0,001
AF	0,853	0,449	0,003
APA	0,452	0,121	0,021
MF	0,573	0,910	0,012
MS	0,730	0,022	0,016
CR	0,787	0,005	0,568

ANEXO D - Resultado da análise de variância para Interação Cobertura x Densidade, Cobertura x Restrição Hídrica, Densidade x Restrição Hídrica, Cobertura x Densidade x Restrição Hídrica (CxDs, CxRH, DsxRH, CxDsxRH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre as características produtivas da Beterraba e Alface em Cambissolo Húmico.

Beterraba	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
EUA	0,824	0,848	0,455	0,984
SPAD	0,227	0,990	0,024	0,659
NF	0,640	0,368	0,533	0,336
MFR	0,798	0,307	0,767	0,689
AF	0,065	0,032	0,024	0,348
BRIX	0,052	0,350	0,741	0,549
MSF	0,033	0,239	0,137	0,224
DR	0,942	0,793	0,842	0,919
MSR	0,941	0,975	0,980	0,371
MST	0,573	0,873	0,593	0,234
Alface	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
EUA	0,281	0,388	0,586	0,603
SPAD	0,014	0,013	0,299	0,987
NF	0,115	0,550	0,866	0,418
AF	0,367	0,818	0,766	0,325
APA	0,256	0,772	0,436	0,142
MF	0,572	0,194	0,685	0,957
MS	0,395	0,258	0,891	0,916
CR	0,582	0,671	0,872	0,395

ANEXO E – Resultado da análise de variância para efeito simples Cobertura, Densidade E Restrição Hídrica (C, Ds, RH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre os atributos físicos e químico do Nitossolo Bruno.

Atributos Físicos	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
Ksat	0,646	0,012	0,251
RP	0,405	0,132	0,441
PT	0,192	0,138	0,270
Ds	0,439	0,260	0,297
Micro	0,010	0,187	0,619
Macro	0,447	0,093	0,034
Criptoporos	0,037	0,218	0,339
CA	0,490	0,054	0,022
AD	0,428	0,649	0,575
APD	0,534	0,982	0,531
CC	0,014	0,086	0,342
PMP	0,050	0,574	0,409
Atributos Químicos	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
COT	0,065	0,750	0,532
COP	0,598	0,174	0,234
COam	0,197	0,218	0,185

ANEXO F - Resultado da análise de variância para Interação Cobertura x Densidade, Cobertura x Restrição Hídrica, Densidade x Restrição Hídrica, Cobertura x Densidade x Restrição Hídrica (CxDs, CxRH, DsxRH, CxDsxRH) a 5 % de significância ($p > 0,05$), sobre os atributos físicos e químico do Nitossolo Bruno.

Atributos Físicos	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
Ksat	<0,001	0,061	0,330	0,381
RP	0,037	0,161	0,323	0,556
PT	0,848	0,289	0,421	0,314
Ds	<0,001	0,837	0,915	0,032
Micro	<0,001	0,509	0,922	0,221
Macro	<0,001	0,710	0,195	0,008
Criptoporos	0,152	0,820	0,282	0,592
CA	0,004	0,536	0,370	0,016
AD	0,198	0,328	0,652	0,540
APD	0,366	0,678	0,730	0,979
CC	0,032	0,569	0,660	0,324
PMP	0,011	0,282	0,351	0,324
Atributos Químicos	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
COT	0,005	0,742	0,800	0,073
COP	0,166	0,448	0,844	0,904
COam	0,021	0,877	0,966	0,360

ANEXO G – Resultado da análise de variância para efeito simples de Cobertura, Densidade E Restrição Hídrica (C, Ds, RH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre as características produtivas da Beterraba e Alface em Nitossolo Bruno.

Beterraba	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
EUA	0,286	0,007	0,123
SPAD	0,024	0,680	0,463
NF	0,320	0,618	0,250
MFR	0,453	0,731	0,065
AF	0,818	0,218	0,906
BRIX	0,010	<0,001	0,054
MSF	0,948	0,860	0,508
DR	0,116	0,635	0,140
MSR	0,239	0,012	0,411
MST	0,475	0,099	0,988
Alface	Cobertura (C)	Densidade (Ds)	Restrição Hídrica (RH)
EUA	0,652	0,066	0,389
SPAD	0,030	0,018	0,415
NF	0,023	0,717	0,055
AF	0,002	0,892	0,062
APA	<0,001	0,035	0,967
MF	0,003	0,010	<0,001
MS	0,012	0,638	0,129
CR	0,215	<0,001	0,126

ANEXO H - Resultado da análise de variância para Interação Cobertura x Densidade, Cobertura x Restrição Hídrica, Densidade x Restrição Hídrica, Cobertura x Densidade x Restrição Hídrica (CxDs, CxRH, DsxRH, CxDsxRH) a 5 % de significância ($p>0,05$), sobre as características produtivas da Beterraba e Alface em Nitossolo Bruno.

Beterraba	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH
EUA	0,298	0,776	0,411	0,268
SPAD	0,676	0,708	0,058	0,275
NF	0,246	0,158	0,781	0,594
MFR	0,034	0,816	0,262	0,097
AF	0,890	0,587	0,767	0,430
BRIX	0,151	0,377	0,971	0,495
MSF	0,761	0,277	0,924	0,458
DR	0,048	0,833	0,986	0,096
MSR	0,165	0,008	0,105	0,043
MST	0,043	0,624	0,371	0,185
Alface	CxDs	CxRH	DsxRH	CxDsxRH

EUA	0,041	0,349	0,025	0,885
SPAD	0,057	0,024	0,378	0,087
NF	0,110	0,943	1,000	0,407
AF	0,055	0,261	0,353	0,217
APA	0,067	0,068	0,796	0,633
MF	0,281	0,073	0,627	0,226
MS	0,488	0,801	0,442	0,139
CR	0,280	0,905	0,279	0,217