



# **Influência da aplicação de biochar e zeólitos na dinâmica de nitrogênio e de outros nutrientes no solo**

**Karolina Rodrigues**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de  
Mestre em Tecnologia Ambiental no âmbito da dupla diplomação com a Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.*

Orientado por:

**Professora Doutora Margarida Arrobas Rodrigues**

**Professora Doutora Morgana Suszek Gonçalves**

**Professor Doutor Manuel Ângelo Rosa Rodrigues**

Bragança

2020



# **Influência da aplicação de biochar e zeólitos na dinâmica de nitrogênio e de outros nutrientes no solo**

**Karolina Rodrigues**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para o efeito da obtenção de Grau de Mestre em Tecnologia Ambiental.*

Orientado por:

**Professora Doutora Margarida Arrobas**

Co-orientado por

**Professora Doutora Morgana Suszek Gonçalves**

**Professor Doutor Manuel Ângelo Rosa Rodrigues**

Bragança

2020

## **AGRADECIMENTOS**

Gratidão, é a palavra mais sincera que consigo expressar por meio da escrita. O meu sincero agradecimento por esse ciclo que aconteceu da melhor maneira possível, resultando em crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço primeiramente a minha orientadora **Prof.<sup>a</sup> Dr. Margarida Arrobas** por toda orientação durante este período de trabalho, pelo zelo, cuidado e atenção, pela paciência e todo o ensinamento transmitido.

Ao meu co-orientador **Prof. ° Dr. Manuel Angelo**, pela ajuda prestada para realização do trabalho. A co-orientadora **Prof.<sup>a</sup> Dr. Morgana Suszek**, que teve papel fundamental na minha formação prévia da realização deste trabalho, pela orientação ainda no Brasil e me fazer apaixonar pelo projeto da composteira e contribuir por toda orientação e incentivo nos projetos realizados no Brasil e total confiança no meu trabalho em Portugal.

A **Dona Rita** e **Dona Ana**, que me ajudaram em todas as análises necessárias para o trabalho no laboratório de solo. A Soraia, na ajuda em análises no CIMO e as parceiras e amigas de laboratório **Monica** e **Jéssica** (Moemos bastante, não é mesmo?).

A UTFPR e ao IPB por toda formação e oportunidades acadêmicas.

Aos meus pais, **Cilene** e **Maézio** que não mediram esforços desde o princípio, incentivando meu sonho de continuar meus estudos, de entrar a universidade e por agora, está aqui, expandindo a minha vida para o mundo. Grata por todo o ensinamento de vida pessoal. Eu sou o que sou, por que vocês me fizeram ser assim. Amo vocês! Aos meus irmãos, **Kalina** e **Bruno**, que deram força nessa caminhada, e me ajudaram sempre que necessitei e ficaram dando forças aos meus pais em relação a saudade. A minha pequena e grande sobrinha **Maria Eduarda**, que mesmo não entendendo muito, sempre esteve aqui com a **tia Karol**.

E claro, que não poderia faltar eles!! A minha família de Portugal, a casa 23. Vocês foram excepcionais neste ciclo. Eu tenho uma verdade para mim, na qual os lugares são feitos de pessoas, e isso muda toda nossa perspectiva sobre o lugar, Portugal foi Portugal, por conta de nós. Primeiro agradeço ao segundo andar, **Bruninho Henrique, Fê** e **Lari**, depois ao primeiro andar, **Bah, Lê, Torrane** e **Carlos**.

*Agradecimentos*

Agradeço ao quinteto fantástico, que juntas, fizemos histórias inesquecíveis na UTF, coraçãozinho para **Aline, Angel, Cássia e Sofis** (Vou te dar um soco Karolina kkk). A muito amiga, Ma, dessa não preciso escrever tanto, pois ela sabe o quanto é importante na minha vida!

A **Leandra Coutinho**, por toda prontidão e amizade em me dar conselhos, quando precisava e para minha amiga do coração **Leh Cornélio**.

Por fim, a toda galera que fez essa história, A HISTÓRIA, por todos os momentos tristes e felizes nesse lugar do outro lado do oceano, em especial a casa 26, **mirandelão, Yago, Dan, Laurete e Cris**.

*Obrigada!*

**RESUMO**

A fertilização nitrogenada tem sido uma boa alternativa para a melhor produtividade na agricultura. No entanto, as aplicações frequentes e generosas conduzem a perdas do nitrogênio (N) principalmente por lixiviação. Os impactos ambientais ocorrem quando há grande quantidade deste nutriente em diferentes ecossistemas, como rios e lagos ou lençóis freáticos. A utilização de condicionadores tem demonstrado a sua utilidade na retenção dos nutrientes no solo reduzindo as perdas para o ambiente. O objetivo deste trabalho foi avaliar o impacto da aplicação de biochar e zeólitos na disponibilidade de N aplicado na forma de ureia para as plantas. Para a realização do trabalho, foi instalado um ensaio em vasos de 3 kg de solo com cinco tratamentos e duas culturas como plantas teste. Os tratamentos foram: Solo (S), Solo + Ureia (SU), Solo + Ureia + Biochar (SUB), Solo + Ureia + Zeólitos (SUZ) e Solo + Ureia + Biochar + Zeólitos (SUBZ). Cada tratamento teve 4 repetições. Em cada vaso foram aplicados nutrientes em quantidades não limitantes para as plantas, como fósforo, potássio e micronutrientes. À exceção do tratamento S, todos os outros tiveram uma quantidade de 360 mg de N por vaso, aplicado na forma de ureia com 45% de N. Os condicionadores (biochar e zeólitos) foram aplicados na quantidade de 15 g/vaso. As plantas utilizadas para testar o efeito dos condicionadores foram alface (*Lactuca sativa* L.), em dois ciclos vegetativos, e azevém (*Lolium multiflorum* L.) sujeito a cinco cortes. Após os ciclos da alface e cada corte no azevém procedeu-se à avaliação da matéria seca produzida. No final do ensaio realizaram-se análises ao solo de cada vaso e a biomassa produzida. No solo, os condicionadores tiveram um impacto positivo no teor de matéria orgânica. Os zeólitos aumentaram a disponibilidade de potássio. De um modo geral verificou-se um decréscimo na disponibilidade de nutrientes associado à presença dos condicionadores, mas a dinâmica de imobilização pareceu depender do tipo de íon. As plantas responderam significativamente à aplicação de ureia e a presença dos condicionadores reduziu a produção. Os condicionadores pareceram limitar a quantidade de nutrientes no solo, reduzindo a sua eventual perda por lixiviação.

**Palavras-chave:** *Lactuca sativa*, *Lolium multiflorum*, condicionadores de solo; plantas indicadoras, análise de biomassa, análise de solo.

**ABSTRACT**

Nitrogen (N) fertilization has been intensively used to increase agricultural productivity. However, frequent and excessive applications lead to N losses from soil. Environmental impacts occur when large amounts of N are lost to water bodies, such as rivers and lakes or even to groundwater. The use of soil conditioners has demonstrated usefulness in retaining nutrients in the soil, reducing losses to the environment. The objective of this study was to evaluate the effect of the application of biochar and zeolites on the availability of N applied as urea to plants. An experiment was performed in pots of 3 kg of soil with five treatments and two crops as plant test. The treatments were: Soil (S), Soil + Urea (SU), Soil + Urea + Biochar (SUB), Soil + Urea + Zeolites (SUZ) and Soil + Urea + Biochar + Zeolites (SUBZ). Each treatment had 4 replications. Phosphorus, potassium, and micronutrients were applied to each pot in non-limiting quantities. With the exception of S treatment, all others received an amount of 360 mg N per pot, applied in the urea form (45% N). The conditioners (biochar and zeolites) were applied in the amount of 15 g per pot. The plants used to test the effect of the soil conditioners were lettuce (*Lactuca sativa* L.), two growing seasons, and ryegrass (*Lolium multiflorum* L.) subjected to five cuts. After each lettuce growing cycle and each cut of ryegrass, the dry matter yield was evaluated. At the end of the experiment, analyses were performed on the soil of each pot and on produced biomass. In the soil, the conditioners had a positive impact on the organic matter content. Zeolites increased potassium availability. In general, it was observed a decrease in soil nutrient availability associated with the presence of soil conditioners, but the dynamics of immobilization seemed depend on the type of ion. The plants responded significantly to the urea application and the presence of conditioners reduced dry matter yield. The soil conditioners seemed to limit the amount of nutrients in the soil, which potentially may reduce nutrient loss by leaching.

**Keywords:** *Lactuca sativa*, *Lolium multiflorum*; Soil conditioners, Indicator plants; Soil testing; Plant analysis.

## ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
3.1	IMPORTÂNCIA DO NITROGÊNIO NOS ECOSISTEMAS .....	4
3.2	TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO NO SOLO .....	5
3.2.1	Amonificação .....	5
3.2.2	Nitrificação .....	6
3.2.3	Desnitrificação .....	7
3.3	O NITROGÊNIO COMO ELEMENTO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL .....	8
3.4	CONDICIONADORES DO SOLO .....	10
3.4.1	Biochar .....	11
3.4.2	Zeólitos .....	12
3.5	PLANTAS UTILIZADAS NA MONITORIZAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE N .....	14
3.5.1	Alface ( <i>Lactuca sativa</i> , L.) .....	14
3.5.2	Azevém ( <i>Lolium multiflorum</i> L.) .....	15
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>17</b>
4.1	ÁREA DE ESTUDO .....	17
4.2	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	17
4.2.1	Característica do solo .....	18
4.2.2	Características dos condicionadores .....	18
4.2.3	Produção dos vasos dos ensaios .....	19
4.2.4	Monitorização dos ensaios .....	20
4.3	ANÁLISES DE SOLOS .....	20
4.3.1	pH .....	20
4.3.2	Fósforo e Potássio – Método Égner Rhiem .....	21
4.3.3	Carbono Orgânico – Método Walkley – Black .....	21
4.3.4	Capacidade de troca catiônica – Bases de troca .....	21
4.3.5	Boro .....	22
4.4	ANÁLISES DE PLANTAS .....	22
4.4.1	Nitrogênio – Método Kjeldahl .....	22
4.4.2	Boro .....	22
4.4.3	P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn .....	22
4.5	EFICIÊNCIA DO USO DO NITROGÊNIO .....	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>24</b>

5.1	PROPRIEDADES DO SOLO APÓS DOIS CICLOS DE ALFACE E APÓS A CULTURA DO AZEVÉM.....	24
5.1.1	pH.....	24
5.1.2	Matéria Orgânica.....	25
5.1.3	Fósforo e Potássio .....	26
5.1.4	Capacidade de troca de cátions .....	28
5.1.5	Micronutrientes .....	32
5.2	PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DA ALFACE.....	34
5.3	CONCENTRAÇÃO DE MACRONUTRIENTES NOS TECIDOS VEGETAIS .....	36
5.3.1	Nitrogênio.....	36
5.3.2	Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio .....	39
5.3.3	CONCENTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES NOS TECIDOS VEGETAIS .....	43
5.4	AZEVÉM.....	45
5.4.1	Produção de matéria seca .....	45
5.4.2	Concentração de macronutrientes nos tecidos vegetais .....	48
5.4.2.1	Nitrogênio.....	48
5.4.2.2	Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio .....	50
5.4.3	Concentração de micronutrientes nos tecidos vegetais .....	52
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>54</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características físico-químicas iniciais do solo usado no estudo. ....	18
<b>Tabela 2.</b> Características dos condicionadores do solo usado no estudo.....	19
<b>Tabela 3.</b> pH em água (H <sub>2</sub> O) e em cloreto de potássio (KCl) do solo após os dois ciclos de alface e após o azevém.....	24
<b>Tabela 4.</b> Teor de matéria orgânica presente no solo após os dois ciclos de alface e após a colheita do azevém.....	26
<b>Tabela 5.</b> Concentração média de Fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) e Potássio (K <sub>2</sub> O) no solo após os dois ciclos de alface e os cortes de azevém.....	27
<b>Tabela 6.</b> Classificação da fertilidade para fósforo (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) e potássio (K <sub>2</sub> O) no solo (LQARS,2006). ....	27
<b>Tabela 7.</b> Concentração de cálcio (Ca <sup>2+</sup> ), magnésio (Mg <sup>2+</sup> ), potássio (K <sup>+</sup> ), sódio (Na <sup>+</sup> ), acidez de troca (AT) e capacidade de troca catiônica (CTC) presente no solo do ensaio com alface.....	29
<b>Tabela 8.</b> Concentração de cálcio (Ca <sup>2+</sup> ), magnésio (Mg <sup>2+</sup> ), potássio (K <sup>+</sup> ), sódio (Na <sup>+</sup> ), acidez de troca (AT) e capacidade de troca catiônica (CTC) presente no solo após os cortes do azevém. ....	30
<b>Tabela 9.</b> Concentração média de Boro (B), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) presente no solo das alfaces após dois ciclos.....	32
<b>Tabela 10.</b> Concentração média de Boro (B), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) presente no solo após os cortes de azevém. ....	33
<b>Tabela 11.</b> Concentração média de Boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e Cobre (Cu) nos tecidos da alface.....	44
<b>Tabela 12.</b> Matéria seca produzida nos cinco cortes do azevém em cada tratamento...	45
<b>Tabela 13.</b> Concentração média de fósforo(P), potássio (K), cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) nos tecidos do azevém.....	51
<b>Tabela 14.</b> Concentrações ideais de macronutrientes para as culturas de acordo com Bryson <i>et al.</i> , (2014).....	52
<b>Tabela 15.</b> Concentração média de Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn) e Manganês (Mn) nos tecidos da cultura de alface do primeiro e segundo ciclo. ....	52
<b>Tabela 16.</b> Concentrações adequadas de micronutrientes para as culturas (Bryson <i>et al.</i> , 2014).....	53

**ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 1.</b> Relação entre os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Cálcio do solo da alfaca. ....	30
<b>Figura 2.</b> Relação entre os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ( $\text{Cmol } (+) \text{ kg}^{-1}$ ) do solo do azevém. ....	31
<b>Figura 3.</b> Matéria seca produzida nos dois ciclos da alfaca em cada tratamento que estas foram submetidas. Para cada ciclo, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ). ....	35
<b>Figura 4.</b> Concentração de nitrogênio nos dois ciclos da alfaca e em cada tratamento. Para cada ciclo, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ). ....	37
<b>Figura 5.</b> Nitrogênio aparentemente recuperado em relação ao tratamento S para os dois ciclos da Alfaca. ....	39
<b>Figura 6.</b> Concentração média de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na matéria seca da alfaca ciclos 1 e 2. Para cada nutriente, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação múltipla de médias de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).....	40
<b>Figura 7.</b> Temperatura no período em que foi realizado este estudo, dados obtidos por IPMAR, 2020.....	47
<b>Figura 8.</b> Acumulativo da matéria seca g/vaso dos cortes do azevém.....	48
<b>Figura 9.</b> Concentração nitrogênio na matéria seca do primeiro corte (Corte 1) e na matéria seca dos restantes cortes (C2/3/4 e 5) do azevém e em cada tratamento. Letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).....	48
<b>Figura 10.</b> Nitrogênio aparentemente recuperado em relação ao tratamento S para os cinco cortes de azevém. ....	50

## **1 INTRODUÇÃO**

O nitrogênio é um elemento importante na natureza e essencial à produção das culturas. Embora a fonte principal deste nutriente se encontre na atmosfera, as plantas utilizam este nutriente a partir do solo. Trata-se de nutriente essencial para o seu desenvolvimento, sendo por vezes limitada a sua disponibilidade em sistemas de cultivo pelo que é frequente a necessidade de o aplicar na forma de fertilizantes (Carvalho e Zobot, 2012).

Por conta do aumento populacional e maior demanda na agricultura para maior produtividade, os fertilizantes têm sido amplamente utilizados para se conseguir obter maior quantidade de alimentos para população global. A variedade dos fertilizantes disponíveis atualmente tem grande influência na produção agrícola e por isso, o uso de fertilização mineral, tem sido boa alternativa para uma suplementação dos macro e micronutrientes requeridos pelas culturas, a fim de obter maior produtividade (Lija *et al.*, 2014).

A prática da fertilização, muitas vezes sem regras, pode resultar na acumulação de espécies nitrogenadas no solo que, quando em excesso, causam desequilíbrios nos ecossistemas com vários tipos de prejuízos dos quais se destacam os de natureza econômica, ambiental e os da saúde humana (Zerulla *et al.*, 2001). No que respeita aos prejuízos econômicos destaca-se a utilização de quantidades muitas vezes superiores às das necessidades das culturas, com reduzido retorno econômico para os agricultores. No que respeita à saúde humana, a presença excessiva de nitrato na água de consumo e em vegetais, devido à lixiviação e a facilidade com que as plantas absorvem nitrogênio além das suas necessidades, podem ocorrer também problemas graves como a metahemoglobinemia. No ambiente em geral, a perda de quantidades elevadas de nitrogênio na forma de nitratos favorece a eutrofização de cursos de água ou lagos e lagoas. Fenômenos frequentes de desnitrificação conduzem à emissão de óxido nitroso para atmosfera (Santos, 2015).

Com vista a promover práticas sustentáveis e a redução de nitratos no ambiente, a União Europeia, através da Diretiva 91/676, determina que os seus Estados-Membros elaborem um código de boas práticas agrícolas. Por conta disso, as preocupações com o

controle do excesso de nitrogênio no solo têm estado presentes na pesquisa, com vista ao desenvolvimento de uma agricultura com responsabilidade ambiental (Rawat *et al.*, 2019)

A pesquisa sobre o impacto da utilização de condicionadores tem sido um caminho da investigação nos últimos tempos, com o objetivo de introduzir melhorias nas características físicas e químicas do solo e para melhorar a produtividade culturas, por meio de um maior controle na disponibilidade de nutrientes (Covalski, 2018). O biochar e zeólitos são exemplos de condicionadores cada vez mais usados em linhas de pesquisas com o intuito da interpretação dos seus efeitos no solo e na performance das planta.

O biochar é o produto da pirólise de biomassas diversas a várias temperaturas na ausência, ou com disponibilidade reduzida, de oxigênio. Possui características de material poroso e por isso serve como habitat para diversos microorganismos. No geral contribui para melhorar propriedades físicas e químicas do solo, podendo ainda ter impacto positivo nos processos de disponibilidade de nutrientes para as plantas (Lehmann e Joseph, 2009).

Os zeólitos são aluminossilicatos frequentemente usados como agentes adsorventes e a sua aplicação na agricultura tem grandes vantagens pois, tal como o biochar, possui alta porosidade e capacidade de troca catiônica, contribuindo igualmente para a liberação lenta dos nutrientes absorvido do solo (Paiva *et al.*, 2004).

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar o efeito dos condicionadores biochar e zeólitos no comportamento dos nutrientes no solo, com especial enfoque no nitrogênio por ser um dos nutrientes que mais contribui para problemas ambientais

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Estudar o efeito do biochar e de zeólitos na mobilidade e transformação do nitrogênio no solo, aplicado na forma de ureia.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Analisar a dinâmica do nitrogênio no solo associada ao uso de condicionadores do solo como biochar e zeólitos; avaliar o impacto dos condicionadores na produção de biomassa de alface e azevém e avaliar o efeito da presença de condicionadores na mobilidade das espécies nitrogenadas (íon amônio e íon nitrato) no solo.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 IMPORTÂNCIA DO NITROGÊNIO NOS ECOSISTEMAS

O nitrogênio (N) é um elemento químico encontrado na forma gasosa na atmosfera e representa 78% do ar atmosférico. É usado na síntese dos ácidos desoxirribonucleico (DNA), ribonucleico (RNA) e proteínas, estando presente nas células de todos os seres vivos (Santos, 2015). Conforme Lee *et al.*, (1983), o N é essencial para a vida e limitador da produtividade no planeta Terra. Porém não são todos os seres vivos que conseguem absorver esse composto, mesmo sendo abundante na atmosfera. Segundo Costa (2015), é um elemento essencial para a dinâmica dos ecossistemas marinhos e terrestres.

O N na atmosfera encontra-se na forma molecular  $N_2$  e possui uma tripla ligação entre seus átomos, o que resulta em uma molécula praticamente inerte (Vieira, 2017), pelo que para a quebra da molécula é necessária muita energia.

A sua entrada no ecossistema terrestre pode ser feita por forma biológica através de bactérias fixadoras (Santoro e Prast, 2011) ou pela forma industrial através do processo Haber Bosch. Este processo ganhou o nome por conta de seus criadores, Fritz Haber e Carl Bosch. Trata-se de um procedimento industrial no qual se utiliza hidrogênio proveniente do metano ( $CH_4$ ) e nitrogênio atmosférico e a partir das reações dos elementos à alta pressão e temperatura, resulta em amoníaco gasoso que a partir da condensação por torres de resfriamento, se transforma no líquido amoníaco ou amônia (Ribeiro, 2013).

O N é um elemento importante para as plantas e seu déficit pode interferir no desenvolvimento e crescimento das mesmas. No entanto, seu excesso pode resultar em acúmulo de nitratos nas folhas, que pode ser prejudicial à saúde humana.

A adubação da alface com nitrogênio influencia a qualidade e produtividade da hortaliça. O N produz um incremento na massa verde e a sua falta ocasiona colapsos e distúrbios na formação de cloroplastos (Ferreira, 2002). A aplicação de N em excesso retarda a senescência e deixa as folhas com maior conteúdo de clorofila (Santos, 2011).

A fixação do N tem grande importância para a ciclagem do N no solo. Sem a fixação por bactérias fixadoras, a deficiência do nitrogênio seria muito frequente e o dinamismo do ecossistema iria cessar. Desta forma, o nitrogênio atua nas plantas como um elemento essencial. Conforme Villar (2007), é um elemento com significativa proporção nos

vegetais que funciona na síntese de proteínas, promovendo um melhor crescimento e qualidade das culturas folhosas.

### 3.2 TRANSFORMAÇÕES DO NITROGÊNIO NO SOLO

No solo, 95% do nitrogênio encontra-se na forma orgânica. Uma pequena quantidade encontra-se na forma mineral, nomeadamente nas formas iônicas de amônio, nitrito e nitrato que são formas inorgânicas importantíssimas na nutrição das plantas. No solo o N passa por várias transformações e reações de natureza química e biológica (Vieira, 2017).

As transformações do nitrogênio no solo podem ser evidenciadas na cadeia alimentar, quando é repassado pelos níveis tróficos. As plantas absorvem parte dele e fica retido no tecido vegetal. Os herbívoros consomem as plantas e tem acesso a esse N. Após o ciclo de vida dos animais e vegetais, diferentes compostos com este elemento retornam ao solo na forma de resíduos. Os resíduos sofrem posteriormente decomposição por ação de organismos decompositores de matéria orgânica transformando-se em compostos ainda orgânicos mais simples como aminas, aminoácidos e ureia (Carvalho e Zabot, 2012, Havlin *et al.*, 2014).

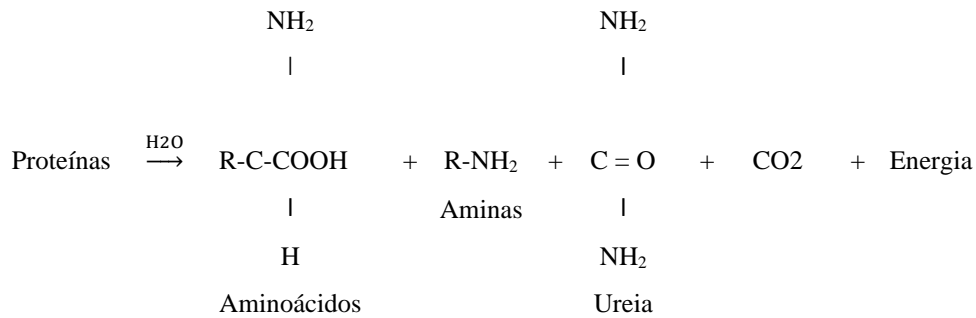
#### 3.2.1 Amonificação

O processo de decomposição dos resíduos mais simples de origem vegetal e animal é chamado amonificação ou mineralização, sendo que estes resíduos são decompostos e resultam na formação do íon amônio  $\text{NH}_4^+$  (Vieira, 2017). A quebra do nitrogênio acontece primeiramente pela despolimerização por ação de enzimas extracelulares que transformam compostos orgânicos em moléculas pequenas e solúveis que podem ser absorvidas ou mineralizadas na forma amoniacal (Vieira, 2017).

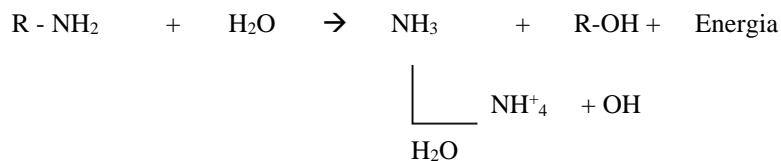
Assim, a amonificação ou mineralização é a transformação do nitrogênio orgânico para nitrogênio inorgânico que fica disponível para as plantas. A conversão do nitrogênio acontece pela ação de bactérias aeróbicas, microrganismos heterotróficos, ou seja, aqueles que não produzem seu próprio alimento, usando assim o nitrogênio orgânico como fonte de energia e os resíduos vegetais ou animais, como fonte de carbono orgânico (Vieira, 2017).

Nas **equações 1 e 2** temos os passos para a formação do íon amônio no solo. A primeira equação representa o processo de aminização e a segunda, amonificação, adaptado de Havlin *et al.*, 2014.

**Equação 1: Aminização**



**Equação 2: Amonificação**



Os microrganismos heterotróficos utilizam o carbono orgânico e nitrogênio, sendo a relação C/N dos compostos orgânicos um fator limitante ao processo. A relação C/N elevada, ou seja, maior que 30, pode incentivar uma maior imobilização do nitrogênio por parte dos organismos do solo e valores inferiores a 20, podem causar o efeito inverso. Assim, valores de C/N por volta de 20 separam os processos de imobilização e mineralização do N do solo (Havlin *et al.*, 2014; Santos, 2015).

3.2.2 Nitrificação

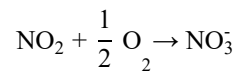
A nitrificação é o processo em que a amônia é transformada em nitritos pelas bactérias quimioautotróficas e posteriormente em nitratos. Assim, a nitrificação ocorre em duas fases oxidativas, estando a primeira (**Equação 3**) associada à formação de nitritos com a ajuda das bactérias *Nitrossomas*. Na primeira fase as bactérias *Nitrossomas*, reduzem a amônia (que foi liberada pelo processo de amonificação) em nitrito.

**Equação 3:** Nitrificação (1º passo)



A segunda fase (**Equação 4**) está associada à formação de nitratos com a participação das bactérias *Nitrobacter* (Santos, 2015, Zoppas *et al.*, 2016).

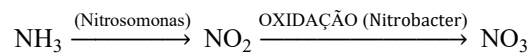
**Equação 4:** Nitrificação (2º passo)



Os principais agentes nitrificantes são as bactérias oxidativas de amônia, bactérias oxidativas de nitrito e as Nitrobacters (Zoppas *et al.*, 2016). Essa transformação ocorre de forma rápida, evitando que o nitrito se acumule nos solos.

De maneira geral e resumida, a nitrificação acontece conforme a reação abaixo (**Equação 5**):

**Equação 5:** Nitrificação (equação global)

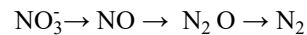


Como o processo de nitrificação acontece por bactérias aeróbias, alguns fatores ambientais devem ser favoráveis à atividade deste tipo de organismos: o solo deve ser areado; a temperatura deverá situar-se entre 25 °C e 30 °C, a umidade deve rondar cerca de 75% da capacidade de campo do solo e o valor de pH do solo deve estar na faixa próximo da neutralidade, já que a acidez compromete o processo (Havlin *et al.*, 2014, Santos, 2015).

### 3.2.3 Desnitrificação

A desnitrificação representa um retorno de N na forma molecular para a atmosfera. Pode ocorrer em situações de excesso de água ou deficiência de oxigênio no solo como é o caso de solos alagados. As bactérias desnitrificantes, anaeróbias facultativas, através de várias reações eliminam o oxigênio e transformam o N em N<sub>2</sub>, de acordo com a reação (**Equação 6**) (Carvalho e Zobot, 2012).

**Equação 6:** Desnitrificação



A desnitrificação consome muito prótons, processo que resulta numa elevação do pH. Esta consumação seria interessante quando se tem um solo ácido, pois assim, aumentaria o pH e poderia deixar o solo mais próximo de valores neutros ou menos ácidos. Contudo, um ambiente ácido não é o ideal para o desenvolvimento de tais microrganismos. Em solos argilosos, com má distribuição de oxigênio, pode haver condições anaeróbia que resultam em desnitrificação, mas essa situação é pouco comum (Santos, 2015).

### 3.3 O NITROGÊNIO COMO ELEMENTO DA POLUIÇÃO AMBIENTAL

O combate mundial à fome fez com que o homem pensasse em melhores formas de aumentar a produção de alimentos. Sabendo-se que o nitrogênio é um nutriente limitante e essencial para o crescimento das plantas, seu uso como fertilizante, se tornou uma boa alternativa para a fertilização de solos, para estes se tornarem mais produtivos.

A partir da produção da amônia em pressão e temperaturas elevadas pelo processo de Haber – Bosch, novas tecnologias foram intensificadas com o objetivo de se proceder a uma produção e utilização em escala industrial de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Ribeiro, 2013). A produção e utilização deste tipo de fertilizantes contribuiu muito para o aumento da produção de alimentos no mundo, resultado útil para responder ao crescimento populacional e às suas necessidades alimentares (Martinelli, 2007).

Foi então a necessidade de aumentar a produtividade para fazer face às necessidades alimentares da população mundial que potencializou o uso de fertilizantes nas áreas rurais e, como resultado, verificou-se uma grande dispersão do nitrogênio no meio ambiente (Garcia *et al.*, 2013).

De acordo com Vieira (2017), no ambiente há um balanço do nitrogênio total, representado pela **Equação 7:**

**Equação 7:** Balanço do nitrogênio

$$N_t = ((N_p + N_b + N_f + N_u + N_m) - (N_p + N_g + N_i + N_l + N_e));$$

Sendo:

Nt: Nitrogênio total;

Np: Nitrogênio de deposição atmosférica;

Nb: Nitrogênio de fixação biológica;

Nf: Nitrogênio com origem em fertilizantes;

Nu: Nitrogênio a partir de bioresíduos (urinas e fezes);

Nm: Nitrogênio mineralizado;

Np: Nitrogênio obtido a partir da absorção das plantas;

Ng: Perda gasosa do Nitrogênio;

Ni: Nitrogênio imobilizado;

Nl: Nitrogênio lixiviado;

Ne: Nitrogênio escoado.

Observa-se a partir da equação que há um significativo ganho de nitrogênio no ambiente, expresso na primeira parte da equação. Porém, há também significativas perdas deste elemento, representadas na segunda parte da equação. Destacam-se as perdas gasosa, lixiviada e escoada que podem representar grandes desafios ambientais por terem impactos negativos.

A maior perda do nitrogênio acontece na forma de íon nitrato que, quando não é absorvido, sofre imobilização pelos micro - organismos, ou sofre lixiviação, fenômeno que pode ser justificado por conta da dominância de cargas negativas existentes nos colóides do solo (argila e húmus) (Sangoi *et al.*, 2003). Por conta das mudanças que o N sofre em seu ciclo, a conversão do íon amônio em íon nitrato faz com que este elemento fique muito móvel no solo. Este íon desloca-se então facilmente para as camadas mais profundas em movimento descendente com a ajuda da água do solo, podendo deste fenômeno resultar em contaminação do lençol freático (Carvalho e Zobot, 2012).

A matéria orgânica é um fator influenciador, pois, com a sua decomposição, há uma maior disponibilidade de nitrogênio no local (Sangoi *et al.*, 2003). A quantidade de água disponível no solo ou os tipos de fertilizantes utilizados no cultivo são também fatores que interferem na perda do nitrogênio por lixiviação.

O enriquecimento dos recursos hídricos com nutrientes como o nitrogênio pode resultar em eutrofização, que é o desenvolvimento de plantas aquáticas que resulta na

diminuição do oxigênio dissolvido, fenômeno que tem consequências na flora e fauna aquática.

Em Portugal encontra-se em vigor a diretiva de nitratos de 12 de novembro de 1991 (91 / 676 /CEE) que determina a quantidade máxima de nitrogênio na forma de nitratos por litro de água potável, situada nos 50 mgL<sup>-1</sup>. Existe também o Código das Boas Práticas Agrícolas publicado no Diário da República anteriormente publicado pelo Ministério da Agricultura Português e recentemente publicado no Diário da República, 2.<sup>a</sup> série, N.º 25 de 5 de fevereiro de 2018. Este documento tem como o principal objetivo orientar para técnicas culturais, que conduzam à redução de nitrato causado por uso de fertilizante em práticas agrícolas, e impedir a propagação da poluição associada à lixiviação de nutrientes ou a outros tipos de perdas como o escoamento superficial que podem conduzir à redução da qualidade da água dos cursos de água, lagos ou lençóis freáticos.

Estes fenômenos podem facilmente conduzir à eutrofização de águas doces superficiais, estuarinas, costeiras e marinhas pelo que se recomenda a identificação de áreas potencialmente susceptíveis a poluição (áreas vulneráveis), elaboração de programas de melhorias para tais áreas, elaboração de boas práticas agrícolas e por fim, relatório quadrienal para a comissão europeia.

As águas de consumo humano carregadas com nitratos podem-se tornar um problema de saúde pública pois, quando o nitrato reage com o sangue, resulta numa desordem designada de metahemoglobinemia, doença causada pela presença de ferro no estado férrico, forma incapaz de se ligar ao oxigênio, situação que impede a passagem de oxigênio para o sangue (Carvalho *et al.*, 2011). Em animais, o excesso de nitrato pode resultar em menores produções de leite, problemas de reprodução, déficit de vitaminas e abortos (Spadotto e Gomes, 2020).

### 3.4 CONDICIONADORES DO SOLO

Os condicionadores são produtos que melhoram as propriedades físicas, químicas ou biológicas do solo podendo ser naturais de natureza orgânica e inorgânica, mas também podem ser de origem sintética (Bernadi *et al.*, 2008). Numa perspectiva de uso eficiente dos nutrientes e água, e no sentido de promover a recuperação de solos degradados, a utilização de condicionadores tem recebido a atenção de vários investigadores (Guo *et al.*, 2020; Doula *et al.*, 2012). Dentre eles, alguns dos mais

utilizados têm sido o biochar e os zeólitos, cujas propriedades genéricas e utilizações mais comuns se descrevem em seguida.

#### 3.4.1 Biochar

O biochar é o produto da queima de biomassa na ausência ou presença limitada de oxigênio, denominado de pirólise. Este processo pode acontecer para temperaturas relativamente baixas, inferiores a 700 °C, sendo que a temperatura de queima pode fazer alterar as propriedades do produto obtido (Lehmann e Joseph, 2009). O biochar tem como características gerais: uma grande área superficial, valor de pH relativamente elevado e poroso. Com a pirólise, 50% do carbono pode ficar retido no produto da decomposição, o que faz o biochar ser um material rico em carbono. O biochar pode alterar algumas propriedades do solo, como pH, retenção de água, porosidade e densidade, pois no solo, ele se oxida de forma gradual e libera compostos carboxílicos e fenólicos. Este produto por ser recalcitrante, pode se manter estável por um bom tempo, desconsiderando os fatores climáticos locais. Além disso, o biochar faz com que o solo retenha mais água e contribua para uma menor lixiviação dos nutrientes (Nóbrega, 2011).

Verheijen *et al.*, (2010) referem que a melhor descrição para o biochar é que se trata de um condicionador no solo e sua persistência no solo pode variar entre dez a mil vezes mais que a permanência da matéria orgânica.

O biochar serve também como habitat para a microbiota do solo, como acontece no caso dos diazotrófos que usam os poros do biochar como sua habitação e ajudam na fixação do nitrogênio no solo, o que é benéfico para a agricultura. Em trabalhos de Ogawa (1994) concluiu-se que o uso de biochar em solos melhorou a capacidade de cultivo e isolamento das bactérias fixadoras de nitrogênio. Trabalhos de Rondon *et al.*, (2007), mostraram que taxas crescentes do uso de biochar aumentam a fixação do nitrogênio e a produção de feijão em 46 %. Esta resposta foi justificada pelo aumento da concentração de molibdênio, boro, pH e N imobilizado.

O uso de biochar aumenta a capacidade de retenção de água nos solos, as trocas iônicas, altera a população de microrganismos e reduz a densidade do solo. Estudos citados por Lehmann e Joseph (2009) mostram que a adição do biochar ao solo promove o aumento do pH e esta alteração favorece o fenômeno de nitrificação.

O biochar pode ainda ajudar na redução da perda de nitrogênio por lixiviação, pois, conforme Steiner *et al.*, (2007) o nitrogênio iria se imobilizar e ficar retido neste condicionador que funciona como se fosse um reservatório de nutrientes. Além de melhorias nas características dos solos, a adição de biochar pode influenciar positivamente na natureza.

Segundo Rawat *et al.*, (2019) o biochar causa efeito *liming* no solo (redução da acidez, aumento do pH) e contribui para retenção de nutrientes e fertilizantes. O biochar apresenta dois mecanismos de ação: adiciona nutrientes no solo provenientes da sua composição, como potássio e outros micronutrientes, e contribui para a retenção de nutrientes de outras fontes, como o próprio solo, aumentando a sua permanência. Estes fenômenos estão relacionados com a sua elevada superfície e densidade de carga (Lehman e Joseph, 2009).

Desta forma a combinação do biochar com outros fertilizantes, pode estar associada a bons resultados no crescimento e produção das culturas. O biochar retém macronutrientes e auxilia na manutenção dos nutrientes na zona das raízes, liberando-os lentamente para a planta. Sendo assim o biochar é um ótimo condicionador para prevenção de perda de nutrientes por lixiviação melhorando assim a qualidade química e biológica do solo (Pereira, 2016, Rawat *et al.*, 2019).

Em conclusão, como o biochar influencia positivamente as propriedades físicas, químicas e biológicas, pode haver um maior crescimento de plantas, resultado em mais biomassa da vegetação e isso representa uma maior captura de dióxido de carbono da atmosfera (CO<sub>2</sub>), refletindo na maior captura de carbono (Lehmann e Joseph, 2009).

#### 3.4.2 Zeólitos

Os zeólitos são minerais aluminossilicatos hidratados de metais alcalinos ou alcalino-terrosos. A sua estrutura possui concavidades com íons de compensação, água, sais e outros aditivos. Com isso, possuem grande superfície interna, que permite a transferência de matérias entre os canais. Porém, a movimentação de matéria é limitada pelo tamanho dos poros dos zeólitos (Luz, 1995).

Os zeólitos são divididos em naturais e artificiais. Segundo Luz (1995), os naturais são oriundos das precipitações de fluídos dos poros dos minerais, ou alterações de vidros vulcânicos que tiveram condições ideais para sua formação (temperatura, pressão e

atividades das espécies iônicas). Os sintéticos ou artificiais são antropizados, podendo ser obtidos a partir de soluções aquosas saturadas e, sob condições ideais, podem formar-se zeólitos com características e composições diferentes. A produção de zeólitos para uso comercial iniciou no ano de 1960 e até então, identificou-se uma variedade de aproximadamente quarenta tipos de zeólitos, tendo sido sintetizados à volta de 150 tipos (Polat *et al.*, 2004).

Uma das classes conhecidas desse mineral é a Clinoptilolite, classe natural do zeólito que é muito usado na indústria alimentícia (rações e aditivos alimentares) e como absorvedor de gás e odor. A Clinoptilolite possui grande número de espaços porosos e é resistente a temperaturas extremas, a sua estrutura química é neutra. Essa classe possui a capacidade de adsorção de amônia e gases tóxicos da água, capacidade de troca de íons, ou catálise. No solo, a Clinoptilolite melhora as suas características físicas e químicas (Polat *et al.*, 2004).

As propriedades mais importantes desse mineral são: a elevada capacidade de retenção de água, elevada capacidade de troca catiônica e captura de íons, propriedades particularmente interessantes para a agricultura. Desta forma, os zeólitos são usados como condicionadores, mas também como fertilizantes do solo (Cejka e Bekkum, 2005). Este tipo de mineral pode contribuir para uma maior eficiência de uso de nutrientes pois, de acordo com Bernardi *et al.*, (2008) disponibiliza uma maior quantidade de fósforo e proporciona um melhor uso do nitrogênio, contribuindo para a redução com perdas por lixiviação de cátions trocáveis. Polat *et al.*, (2004) referem que, na agricultura, a Clinoptilolite promove uma melhor eficiência no uso de fertilizantes, fato que é corroborado pelo maior crescimento e rendimento das plantas após a sua aplicação ao solo. Ao adicionar zeólitos com outros fertilizantes verifica-se uma maior absorção dos nutrientes pelas plantas (nitrogênio, potássio, magnésio e micronutrientes), uma melhoria geral na qualidade do solo e menor perda dos nutrientes para o ambiente por lixiviação.

Outros autores (Bernardi *et al.*, 2008) também constataram que os zeólitos funcionam como condicionadores naturais do solo, que auxiliam na retenção de água e contribuem para uma maior disponibilidade de água no solo para a vegetação. Alguns autores afirmaram que o uso de zeólitos aumentou a produtividade de gérberras e que eles propiciaram uma maior troca catiônica e disponibilidade de nutrientes. Em estudos

realizados por Soares (2010), foi evidenciado que o uso de zeólitos contribuiu para uma maior produtividade de alfafa, tendo contribuído para o aumento em 30% da matéria seca.

Os zeólitos possuem ainda uma aplicação ampla na indústria civil, sendo usados na produção de tijolos, cimentos, materiais de construção, tintas, desfluorização de resíduos industriais, são usados também como agentes removedores de mercúrio, de metileno, entre outras substâncias (Polat *et al.*, 2004).

### 3.5 PLANTAS UTILIZADAS NA MONITORIZAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE N

As plantas utilizadas na monitorização da disponibilidade de nutrientes são plantas que dão indicação das condições do ambiente onde estão instaladas, sendo elas de cenário otimista ou não (Leite e Meira, s/d). Algumas plantas, conforme suas características de crescimento podem ser usadas para avaliar a disponibilidade de um nutriente no solo.

#### 3.5.1 Alface (*Lactuca sativa*, L.)

Popularmente conhecida como alface, é originária da região mediterrânea e possui alta diversidade, com grupos de alfaces lisa, crespa, americana, roxa, mimosa, romana e crocante (Aguilar *et al.*, 2014). A temperatura ideal para o cultivo desta planta situa-se entre 15 e 20 °C. Todavia, a hortaliça é resistente a temperaturas de 0 °C. Para temperaturas inferiores a 6 °C a planta pode apresentar necroses. Temperaturas altas também podem trazer consequências desadequadas, como espigamento, que encurta o ciclo vegetativo. Em estufas, o ciclo pode durar de 6 a 8 semanas entre primavera e verão e de 10 a 12 semanas nos meses de inverno (Moreira, 2018).

Em relação aos solos, a alface adapta-se bem em muitos tipos de solos, tendo um melhor desenvolvimento em solos sílico - argilosos. É interessante saber que a alface pode ser sensível a solos muito ácidos ou muito alcalinos. Assim, valores de pH neutros permitem um bom desenvolvimento desta hortícola folhosa (Tavares, 1988).

Trata-se de uma cultura de crescimento relativamente rápido e responde bem à disponibilidade de N, o que a torna adequada para monitorizar a quantidade de N no solo, razão pela qual tem sido muito utilizada em ensaios que testam o efeito da aplicação deste tipo de condicionadores. Os trabalhos realizados por Medeiros *et al.*, (2001), Andrade *et al.*, (2011), Petter *et al.*, (2012), Pereira (2016) e Chaib (2019) entre outros autores,

demonstram isso. Além disso, a alface também é uma ótima indicadora de elementos tóxicos como os metais pesados, pois o estado da sua fisiologia denuncia a qualidade do meio em que está inserida (Moreira, 2018).

No Brasil, é a hortaliça mais consumida no país, sendo importante para a economia e alimentação brasileira. Possui um ciclo vegetativo curto, o que gera um rápido retorno financeiro (Milhomens *et al.*, 2015).

Na União Europeia é uma das hortícolas mais importantes, por conta de ser um produto de fácil aquisição e custo baixo. Em Portugal, a alface é cultivada e consumida por todo país (Moreira, 2018).

A aplicação de fertilizantes à base de nitrogênio é de grande importância para esta cultura, pois a carência de nitrogênio atrasa o crescimento, aumenta a clorose das folhas e causa má formação da cabeça, para além da diminuição da produção folhosa. No entanto, a aplicação de N em demasia também reduz a produção, a formação de cabeça e aumenta a senescência das folhas. Consta-se ainda que doses de adubação nitrogenada em excesso podem resultar em consequências na saúde humana pelo efeito da acumulação de N na forma de nitratos (Santos, 2015).

### 3.5.2 Azevém (*Lolium multiflorum* L.)

Popularmente chamado de azevém, o *Lolium multiflorum* é uma gramínea forrageira, de ciclo anual com alta produção e consumo por animais. O azevém tem rápida germinação, num prazo de 7 a 10 dias e alto recrescimento. O uso de fertilizantes nitrogenados nesta cultura podem ser uma prática adequada para o aumento da sua produtividade (Queiroz, 2019).

Na região sul do Brasil, a gramínea se desenvolve como praga em culturas de trigo, mas ainda é usada como planta de forragem do solo nos meses de inverno (Roman *et al.*, 2014).

O azevém possui resistência a temperaturas baixas, apresenta uma boa qualidade nutricional e alto potencial de produção de matéria seca. Esta planta possui boa capacidade de rebrote e sementeira. Essas características são interessantes para ser uma planta usada para pastoreio de gado. O azevém, além do rápido rebrote é um alimento apetecível para os ruminantes pelo alto teor de proteína e fácil digestão (Fontaneli *et al.*, 2012).

Conforme Fontaneli *et al.* (2012) o azevém adapta-se em quase todos os solos. Porém tem um melhor desenvolvimento em solo de textura média e ligeiramente úmidos (não resiste ao encharcamento). Suas raízes são curtas, chegando a 15 cm, adaptando-se por isso a solos pouco espessos, mas pouco resistente à seca. Em temperaturas próximas a 20 °C o azevém tem bom crescimento. De acordo com Queiroz (2019), o azevém prefere solos de pH próximo da neutralidade (6,2 – 6,8), embora possa resistir a solos pouco ácidos.

O uso de adubo nitrogenado é adequado para promoção do aumento da biomassa. Como possui uma alta taxa de rebrote e ressemeadura natural, pode produzir até 6,0 toneladas de matéria seca por ha (Fontaneli *et al.*, 2012). Esta característica torna esta cultura especialmente adequada para ensaios de esgotamento de nutrientes no solo pela possibilidade de se poderem efetuar múltiplos cortes durante os experimentos.

Tal como a alfaca, também o azevém tem sido usado como planta indicadora para ensaios com fertilizantes nitrogenados e uso de condicionadores (Pellegrini, 2010; Toole, 2010; Hunt, 2013; Oliveira *et al.*, 2014).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 ÁREA DE ESTUDO**

Os ensaios foram instalados e monitorados nas estufas do Instituto Politécnico de Bragança – IPB, localizado no município de Bragança, nordeste de Portugal. As estufas estão localizadas nas coordenadas 41°47'48,46''N e 6°45'43,25''W com altitude de 674 m. Conforme a classificação de *Koppen*, a cidade de Bragança possui um clima Csb, ou seja, é um clima temperado com inverno chuvoso e verão seco e pouco quente (Csb) (Instituto Português do Mar e da Atmosfera - IPMA, 2019).

De acordo com os resumos meteorológicos do IPMA, no ano de 2019 e 2020, as temperaturas médias dos meses de outubro, novembro, dezembro, março, abril e maio foram de 14,1°C; 8,8°C; 6,6°C; 10,1°C; 12,1°C; 17,7°C, respectivamente. De acordo com os dados históricos (1971-2000) o valor médio anual de precipitação é de 758 mm (IPMA, 2020).

### **4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL**

Para a realização deste trabalho foram estabelecidos cinco tratamentos, com a seguinte composição:

- Solo (S);
- Solo + Ureia (SU);
- Solo + Ureia + Biochar (SUB);
- Solo + Ureia + Zeólitos (SUZ);
- Solo + Ureia + Biochar + Zeólitos (SUBZ).

Todos os vasos tiveram um suplemento de nutrientes em quantidades não limitantes ao crescimento das plantas, sendo aplicados 150 mg de fósforo na forma de  $P_2O_5$  e potássio na forma  $K_2O$ , a cada kg de solo. Os fertilizantes usados foram o superfosfato e cálcio com 18% de  $P_2O_5$ , e cloreto de potássio com 60% de  $K_2O$ , respectivamente. O magnésio, boro, cobre, ferro, zinco e manganês foram aplicados com um produto comercial, Oligomag, nas concentrações recomendadas na embalagem. O nitrogênio foi aplicado na quantidade de 120 mg por cada kg de solo usando o fertilizante

ureia, com 45% de N. Biochar e zeólitos foram aplicados na quantidade de 5 g/ kg de solo, o que equivale a 10 toneladas por hectare considerando as quantidades recomendadas por Milosevic (2009), e a partir da estimativa de Rowell (1995) de que cada ha de terra tem cerca de 2000 toneladas de terra fina. De cada tratamento foram estabelecidas 4 repetições e usados dois tipos de plantas indicadoras: alface e azevém, resultando em 40 réplicas.

#### 4.2.1 Característica do solo

O solo do estudo é classificado como Regossolo Êútrico de origem coluvial de textura franco-limosa. Na **Tabela 1** estão as características químicas do solo.

**Tabela 1.** Características químicas iniciais do solo usado no estudo.

Matéria Orgânica %		2,01 ± 0,19
pH	H <sub>2</sub> O	6,77 ± 0,09
	KCl	5,87 ± 0,07
Micronutrientes (mg kg <sup>-1</sup> )	B	0,30 ± 0,04
	Cu	41,14 ± 3,34
	Zn	3,52 ± 0,45
	Fe	85,54 ± 2,09
	Mg	115,68 ± 9,08
Fósforo e potássio (mg kg <sup>-1</sup> )	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	115,87 ± 29,68
	K <sub>2</sub> O	194,00 ± 59,40
Complexo de troca (Cmol (+) kg <sup>-1</sup> )	Ca <sup>++</sup>	11,63 ± 0,62
	Mg <sup>++</sup>	4,24 ± 0,34
	K <sup>+</sup>	0,45 ± 0,12
	Na <sup>+</sup>	1,58 ± 0,13
	AT (NaOH)	0,00 ± 0,00
	CTC	17,90 ± 0,71

#### 4.2.2 Características dos condicionadores

Para o trabalho foi usado biochar do produto pirolisado de lenha de poda de acácia, tratada a 600 °C, conhecido como Ecochar. Os zeólitos utilizados foram da marca Zeocel. Na **Tabela 2**, estão especificadas as características de ambos.

**Tabela 2.** Características dos condicionadores do solo usado no estudo.

Propriedades	Biochar	Zeólitos
Umidade (%)	33,00	3,29
pH	9,16	6,61
Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	948	53,40
C (%)	51,76	2,10
N (%)	0,50	0,00
C/N	103,52	-
Matéria Orgânica (%)	89,02	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0,03	0,09
K <sub>2</sub> O (%)	0,15	1,49
CaO (%)	-	5,78
MgO (%)	-	0,92
Na <sub>2</sub> O (%)	-	2,39
B (mg kg <sup>-1</sup> )	-	0,41

#### 4.2.3 Produção dos vasos dos ensaios

Os ensaios foram montados em vasos de polietileno, sendo necessários 40 vasos para todas as réplicas. O solo usado no experimento foi da área próxima da estufa, da camada 0-20 cm. O solo foi homogeneizado e adicionado 3 kg em cada vaso. Foi também fertilizado com fósforo, potássio e uma solução de micronutrientes sendo o nitrogênio o único nutriente a variar.

Foram efetuados dois ciclos de alface, tendo o primeiro iniciado em 4 de outubro de 2019 e encerrado dia 13 de dezembro de 2019 o segundo em iniciado em 30 de março de 2020 e encerrado em 18 de maio de 2020. No primeiro ciclo foram utilizadas mudas obtidas na feira municipal de Bragança e para o segundo ciclo as mudas foram desenvolvidas a partir de uma sementeira que decorreu nas estufas e posteriormente transplantadas para os vasos.

A variedade da alface foi, em ambos os ciclos, a “Maravilha de Verão”. Na plantação foi realizada uma pequena cova no centro de cada vaso com o auxílio de uma espátula de jardim, onde foram colocadas as raízes de cada muda. No final de cada ciclo as alfaces foram colhidas e levadas ao laboratório. As alfaces foram pesadas e depois cortadas com auxílio de uma faca. O corte foi feito para ajudar na secagem das plantas.

Após os cortes, as alfaces foram levadas para uma estufa de ventilação forçada Memmert e colocadas a 70 °C até peso constante. Depois de secas, foram novamente pesadas para avaliação da matéria seca e moídas num moinho Cyclotec da marca FOSS, com um crivo de 1 mm de malha.

O azevém foi semeado no dia 14 de outubro de 2019 com a colocação de cerca de 100 sementes em cada vaso. Devido ao seu crescimento foram realizados 5 cortes. O primeiro corte ocorreu no dia 9 de dezembro de 2019. Em 2020 foram efetuados cortes a 7 de fevereiro, 28 de março, 8 de maio e 2 de junho. À semelhança do que ocorreu com as alfaces, a biomassa de azevém foi levada para o laboratório e seca em estufa de ventilação forçada a 70 °C até peso constante. Posteriormente foi pesada e moída num moinho com um crivo de 1 mm de malha.

#### 4.2.4 Monitorização dos ensaios

Para o sucesso da pesquisa, os ensaios foram monitorados diariamente. Assim eram regados conforme a necessidade para o equilíbrio hídrico. No período de inverno as regas aconteciam com menor frequência, pois as condições ambientais não favoreciam a absorção de água nem a transpiração. No período de primavera, as plantas eram regadas diariamente devido à maior temperatura verificada. Durante os ciclos vegetativos das alfaces foram também sendo eliminadas as infestantes de forma manual.

### 4.3 ANÁLISES DE SOLOS

No final do ensaio as amostras de solos foram retiradas de cada vaso de acordo com o tratamento e repetição. Todos os solos passaram por um crivo de 2mm.

O solo foi posteriormente sujeito a um conjunto de procedimentos físicos e químicos que visaram avaliar as características e propriedades do solo após a aplicação dos condicionadores.

#### 4.3.1 pH

Foram pesadas 10 g de terra fina em copos de vidro de 100 ml. Foram adicionados 25ml de água destilada. A suspensão foi agitada ocasionalmente num período de 2 horas. Com o medidor de pH FiveEasy – Metter Toledo, foi medido o pH através da imersão do eletrodo na suspensão (Van Reeuwijk, 2002).

#### 4.3.2 Fósforo e Potássio – Método Égner Rhiem

Para a análise de fósforo e potássio, foram pesadas 2 g de solo para frascos de agitação de 250 ml, aos quais foram adicionados 40 ml de uma solução de lactato de amônio e ácido acético tamponada a pH 3,7. Os frascos foram agitados durante 2 horas a 180 rotações por minuto. Ao fim das duas horas, a solução foi filtrada (Almeida e Balbino, 1960). Para a análise de fósforo foi retirado um ml do filtrado ao qual foram adicionados 4 ml de uma solução de desenvolvimento de uma cor azul, método azul de molibdato, com ácido ascórbico como agente redutor. A intensidade de cor foi avaliada a 882 nm num espectrofotômetro UV/VIS da marca PG Instruments. O potássio foi determinado por fotometria de chama num fotômetro de chama PFP7 da marca Jenway.

#### 4.3.3 Carbono Orgânico – Método Walkley – Black

Foi colocada 1g de terra fina num erlenmeyer, e posteriormente adicionados 10 ml de dicromato de potássio e 20 ml de ácido sulfúrico como agente oxidante, criando assim uma reação exotérmica que decorreu por 30 minutos. No fim deste tempo adicionaram-se 250 ml de água destilada e 5 gotas do indicador fenatrolina. O excesso de dicromato na solução (que não reagiu com o carbono) foi titulado com uma solução de sulfato de ferro amoniacal 0,5M. O teor de matéria orgânica do solo foi avaliado através do produto da percentagem de C avaliado na reação pelo fator de 1,724, fator relacionado com o pressuposto de que o teor de matéria orgânica que contém 58% de carbono (Nelson e Sommers, 1996)

#### 4.3.4 Capacidade de troca catiônica – Bases de troca

O método utilizou uma solução de sal neutro para substituir os cátions presentes no complexo de troca de solo. A amostra foi extraída com uma solução de acetato de amônio ajustado ao pH 7,0. Foram pesadas 2,5 g de solo para frascos de agitação às quais se adicionou 50 ml da solução. No filtrado, o cálcio e magnésio foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e potássio de sódio por espectrofotometria de emissão, tendo sido usado um equipamento Perkin Elmer nestas determinações (van Reeuwijk, 2002).

#### 4.3.5 Boro

O boro foi extraído pelo método de extração de água fervente e determinado por meio de um procedimento colorimétrico. A extração do boro aconteceu em bolsas de plástico fechadas, com adição de cloreto de cálcio 0,01M que minimiza erros positivos ocasionados pela coloração amarela. Os extratos foram analisados após o desenvolvimento de cor com a ajuda do reagente azometina-H. Para a leitura das amostras foi usado o equipamento espectrofotômetro T80+ UV/VIS da marca PG Instruments, no comprimento de onda de 420 nm (Keren, 1996).

### 4.4 ANÁLISES DE PLANTAS

#### 4.4.1 Nitrogênio – Método Kjeldahl

O procedimento de Kjeldahl utilizado para determinação da concentração de N nos tecidos envolveu duas etapas: uma digestão ácida da amostra para converter N orgânico para  $N-NH_4^+$  e determinação posterior da concentração deste íon na amostra digerida. Esta determinação foi feita pela recolha de  $NH_3$  libertado numa destilação com a ajuda da adição de NaOH e a quantificação de  $NH_4^+$  no destilado foi feita por titulação. Para o efeito foi usado um equipamento automático 8400 da marca FOSS (Bremner, 1996).

#### 4.4.2 Boro

Para a análise de boro foi pesado 1g de amostra ao qual se adicionou 0,10 g de óxido de cálcio - CaO. A amostra foi posteriormente colocada em forno mufla por 90 minutos a 500°C. Após o resfriamento das amostras, foi adicionado ácido sulfúrico 0,5 M para solubilização das cinzas. Após essa solubilização a solução foi filtrada e o extrato foi analisado por procedimento colorimétrico usando a azometina-H como agente de desenvolvimento de cor e leitura no espectrofotômetro (Temminghoff e Houba, 2004).

#### 4.4.3 P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn

A determinação dos elementos P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Zn e Mn necessitou de uma mineralização prévia das amostras de tecidos vegetais. Para tais análises as amostras moídas de alfaves e azevém foram pesadas na quantidade de 0,25 g e adicionados 10 ml

de ácido nítrico 70%. A mistura foi introduzida num equipamento de digestão por micro-ondas CEM Mars Xpress por 60 minutos. Após a digestão, as amostras foram diluídas com água destilada até completar 50 ml. Os elementos catiônicos foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Para o fósforo, após diluições adequadas das amostras, foi executado o procedimento de desenvolvimento de cor pelo método azul de molibdato que usa o ácido ascórbico como agente redutor (Temminghoff e Houba, 2004).

#### 4.5 EFICIÊNCIA DO USO DO NITROGÊNIO

Com o objetivo de se compreender a influência dos condicionadores na eficiência do uso do nitrogênio por parte da alface aplicou-se também a equação de Sangeetha e Baskar, (2016):

**Equação 8:** Eficiência do uso do nitrogênio

$$NAR = \frac{Nef - Net}{Na} \times 100$$

NAR – Nutriente aparentemente recuperado;

Nef – Nutriente exportado na modalidade fertilizada;

Net – Nutriente exportado na modalidade testemunha, sem o nutriente em estudo;

Na – Nutriente aplicado;

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 PROPRIEDADES DO SOLO APÓS DOIS CICLOS DE ALFACE E APÓS A CULTURA DO AZEVÉM

#### 5.1.1 pH

O pH é uma das propriedades químicas que mais influencia a disponibilidade de macro e micronutrientes. Para valores de pH próximos da neutralidade (6 a 6,5) pode verificar-se uma disponibilidade máxima dos macronutrientes, ainda, pH inferiores a neutralidade diminui a absorção dos cátions e pH superiores a 7 diminui a absorção de ânions (Villar, 2007).

A partir da **Tabela 3** observa-se os valores médios de cada método de extração para determinação de pH, de acordo com os distintos tratamentos em dois ciclos da alface.

**Tabela 3.** pH em água (H<sub>2</sub>O) e em cloreto de potássio (KCl) do solo após os dois ciclos de alface e após o azevém.

	S	SU	SUB	SUZ	SUBZ
<b>Alface</b>					
H <sub>2</sub> O	6,56 a ± 0,07	6,54 a ± 0,01	6,62 a ± 0,05	6,52 a ± 0,03	6,57 a ± 0,03
KCl	5,59 b ± 0,06	5,81 a ± 0,04	5,78 a ± 0,18	5,89 a ± 0,02	5,91 a ± 0,02
<b>Azevém</b>					
H <sub>2</sub> O	6,68 b ± 0,08	6,69 b ± 0,04	6,76 b ± 0,09	6,93 a ± 0,01	6,94 a ± 0,03
KCl	6,29 a ± 0,03	6,32 a ± 0,11	6,34 a ± 0,12	6,23 a ± 0,01	6,23 a ± 0,01

Para o mesmo tipo de pH, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Após a colheita de alface, os valores de pH (H<sub>2</sub>O) não apresentaram diferenças significativas entre si a 5% de significância, com valores a variarem entre 6,52 no tratamento SUZ e 6,57 no tratamento SUBZ. Resultados diferentes verificaram-se após os cortes do azevém, com valores significativamente diferentes nos tratamentos com zeólitos e mais elevados do que os verificados no ensaio com alface. Os valores variaram entre 6,68 no tratamento S e 6,93 e 6,94 nos tratamentos SUZ e SUBZ. Estes efeitos significativos devem estar relacionados com a maior atividade radicular verificada no ensaio de azevém uma vez que não houve nenhum período de solo sem plantas. De notar que no ensaio da alface o solo esteve cerca de três meses sem plantas entre ciclos. De acordo com Toole (2013), em seu trabalho com biochar e azevém, constatou também, um

aumento substancial do pH, quando adicionado o biochar no solo. Apesar destas diferenças significativas, a magnitude de variação não é muito elevada, o que poderá estar relacionado com a natureza neutra do solo usado neste trabalho. Este solo tem na sua origem um substrato ultrabásico (Afonso e Arrobas, 2009) o que, naturalmente, limita o impacto dos condicionadores no valor de pH.

No que respeita aos resultados de pH em KCl apenas se registrou um valor significativamente mais baixo no tratamento S após os dois ciclos de alface. Neste ensaio os valores variaram entre 5,59 no tratamento S e 5,91 em SUBZ. No ensaio do azevém os valores foram mais elevados do que no ensaio da alface, tendo variado entre 6,29 em S e 6,34 em SUB sem diferenças significativas entre tratamentos. As diferenças nos valores nos dois ensaios devem estar também relacionadas com os tempos de ocupação do solo pelas culturas que alteraram a dinâmica das trocas iônicas no solo.

A ureia no solo sofre transformações em amônio e posteriormente em nitrato, que são formas iônicas que as plantas conseguem absorver. Desta maneira, quando aplicada no solo é hidrolisada pela uréase que forma amônio e há liberação de íons  $\text{OH}^-$  que resulta numa elevação do pH (Guarçoni, 2008). Já o biochar contribui para o melhoramento da fertilidade e qualidade do solo, além de aumentar o valor de pH (efeito *limming*) (Rawat *et al.*, 2019). Os zeólitos em geral possuem valores próximos a alcalinidade e isso ajuda a corrigir solos ácidos. Porém, neste estudo, e como já foi referido, estes efeitos não estiveram em destaque muito provavelmente devido à natureza do solo utilizado.

Os valores de pH em KCl foram menores do que os extraído por água. O KCl em contato com o solo provoca a troca catiônica por conta da maior concentração dos íons  $\text{K}^+$ , que libera íons  $\text{H}^+$  e  $\text{Al}^{3+}$  adsorvidos no complexo de troca para a solução solo, o que resulta numa maior acidez (Ebeling, 2008) e justifica os valores mais baixos de pH relativamente aos valores de pH em água.

### 5.1.2 Matéria Orgânica

Após os dois ciclos de alface verificou-se que os valores de matéria orgânica variaram entre 2,1% no tratamento S e 2,45% no tratamento SUBZ (**Tabela 4**). No ensaio do azevém os valores foram um pouco mais baixos, tendo variado entre 1,91% em SU e 2,27% em SUZ. Nos dois ensaios os tratamentos sem adição de biochar ou zeólitos (S e SU) apresentaram os valores significativamente mais baixos de matéria orgânica.

**Tabela 4.** Teor de matéria orgânica presente no solo após os dois ciclos de alface e após a colheita do azevém.

	Matéria Orgânica (%)				
	S	SU	SUB	SUZ	SUBZ
<b>Alface</b>	2,1 d $\pm$ 0,05	2,14 cd $\pm$ 0,03	2,33 ab $\pm$ 0,08	2,25 bc $\pm$ 0,07	2,45 a $\pm$ 0,08
<b>Azevém</b>	1,92 c $\pm$ 0,04	1,91 c $\pm$ 0,04	2,11 b $\pm$ 0,06	2,27 a $\pm$ 0,07	2,12 b $\pm$ 0,04

Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Os condicionadores melhoram a qualidade do solo o que pode resultar melhor desenvolvimento vegetativo e possível aumento da matéria orgânica no solo. Após os dois ciclos da alface os maiores valores estiveram associados à presença de biochar (SUBZ e SUB). Sabe-se que o biochar é um resultante da biomassa pirolisada e que é rico em carbono e isso pode explicar os resultados maiores de matéria orgânica quando adicionado biochar. Os valores entre os tratamentos tiveram diferenças significativas no solo após dois ciclos da alface.

No ensaio do azevém, sobressaiu o valor de matéria orgânica no solo sendo significativamente superior no tratamento SUZ. Dos tratamentos com aplicação de condicionadores, este foi o que apresentou a produção mais elevada, o que terá contribuído também para a existência de maior quantidade de matéria orgânica no solo associada ao maior volume do sistema radicular. De qualquer forma, os resultados não deixam dúvidas sobre o efeito positivo da adição de biochar e de zeólitos no teor de matéria orgânica do solo, o que está de acordo com os resultados obtidos por outros pesquisadores (Butorac *et al.*, 2002, Agegnehu *et al.*, 2017).

### 5.1.3 Fósforo e Potássio

Após os dois ciclos de alface, os valores de fósforo variaram entre 124,3 mg kg<sup>-1</sup> no tratamento SU e 156,84 mg kg<sup>-1</sup> no tratamento S. Este último valor foi significativamente superior aos outros tratamentos, com exceção do tratamento SUBZ (**Tabela 5**). Para o potássio, os valores variaram entre 80,5 e 124,5 mg kg<sup>-1</sup> nos tratamentos SU e SUZ, respectivamente. O valor em SUZ foi significativamente superior aos obtidos em SU e SUB.

**Tabela 5.** Concentração média de Fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e Potássio (K<sub>2</sub>O) no solo após os dois ciclos de alface e os cortes de azevém.

		S	SU	SUB	SUZ	SUBZ
<b>Alface</b>	Fósforo	156,84 a ± 16,94	124,3 b ± 3,94	129,3 b ± 5,85	131,03 b ± 11,06	133,42 ab ± 13,43
	Potássio	107,75 ab ± 11,24	80,5 c ± 4,93	88,5 bc ± 7,63	124,5 a ± 11,27	100,5 abc ± 20,76
<b>Azevém</b>	Fósforo	166,89 ± 17,04	147,84 ± 8,64	161,02 ± 18,50	164,33 ± 15,82	156,76 ± 14,72
	Potássio	102 bc ± 6,58	87d ± 3,83	89,5cd ± 1,29	118,75a ± 9,91	113,5ab ± 5,07

Nas linhas, letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

De acordo com a classificação dos valores de potássio no solo extraídos pela solução de Égner-Riehm, os valores registrados nos tratamentos SU e S são classificados de *médios*, e os restantes são classificados de *altos*. (**Tabela 6**).

**Tabela 6.** Classificação da fertilidade para fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e potássio (K<sub>2</sub>O) no solo (LQARS,2006).

	Classe fertilidade mg.kg <sup>-1</sup>				
	Muito baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
<b>Fósforo</b>	≤ 25	26-50	51-100	100-200	≥ 200
<b>Potássio</b>	≤ 25	26-50	51-100	100-200	≥ 200

Para o solo após os cortes de azevém, o fósforo variou entre 147,84 e 166,89 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente nos tratamentos SU e S (tabela 5). No entanto, neste caso não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos. À semelhança do verificado após a cultura da alface, os valores de fósforo registrados no solo são classificados de *altos* (**Tabela 6**). Já após a cultura do azevém, os resultados de potássio no solo mostraram a mesma tendência verificada no caso da alface, ou seja, os maiores valores registraram-se nos tratamentos com zeólitos que foram significativamente superiores aos obtidos nos restantes tratamentos. Os valores variaram entre 87 mg kg<sup>-1</sup> em SU e 118,75 mg kg<sup>-1</sup> em SUBZ, com as classificações de *médio* associadas genericamente aos tratamentos sem zeólitos.

O trabalho de Akbari *et al.*, (2020) com uso de zeólitos e tratamentos integrados com fertilizantes orgânicos e químicos, mostrou aumento de valores nos resultados de nitrogênio, fósforo e potássio no solo, fato justificado com o comportamento dos zeólitos que atuam no armazenamento desses elementos e os liberam lentamente com o tempo.

Conforme Polat *et al.*, (2004) a combinação dos zeólitos com fertilizantes ajuda na retenção dos nutrientes e na redução da perda dos nutrientes mais importantes para a

planta, como nitrogênio e potássio, além do cálcio, magnésio e micronutrientes. Estes resultados suportam os obtidos neste trabalho. Além disso, os maiores valores de potássio no solo também estão relacionados com a riqueza deste elemento neste tipo de condicionador (**Tabela 2**), sendo por isso natural que a sua adição ao solo tenha uma influência positiva na disponibilidade deste nutriente. Este efeito foi também já reportado por outros pesquisadores (Ming e Allen, 2001). A ureia promoveu acréscimo de produção como se verá à frente, o que resultou na exportação dos nutrientes e a falta dos condicionadores que poderiam repor nutrientes no solo resultou na sua diminuição significativa. No caso dos tratamentos com biochar, este condicionador deverá ter imobilizado parte do potássio.

#### 5.1.4 Capacidade de troca de cátions

A capacidade de troca catiônica (CTC) do solo corresponde a uma quantidade de cargas negativas que o solo possui que atraem e retêm cátions e permitem a liberação contínua dos nutrientes, o que ajuda a manutenção da fertilidade do solo por mais tempo, gerando impactos positivos relacionados a taxa de utilização dos fertilizantes aplicados (Weil e Brady, 2017). Uma CTC com grandes porcentagens em cátions essenciais (cálcio, magnésio e potássio) indica, em geral, um solo de boa qualidade nutricional das plantas. Quando a CTC estiver associada uma quantidade elevada de hidrogênio e alumínio, este solo pode ser problemático por conta de cátions tóxicos (Ronquim, 2010). Os cátions podem ficar sustentados na argila ou matéria orgânica do solo e serem trocados por outros cátions. Assim, a quantidade de argila e matéria orgânica são os constituintes que mais podem influenciar o valor da CTC.

O cálcio na CTC é, na maioria das situações, um cátion dominante e fácil de ser absorvido pelas plantas. O excesso deste nutriente pode resultar em desequilíbrios nutritivos, nomeadamente em magnésio, manganês, zinco e outros nutrientes (LQARS, 2006). No solo, o magnésio possui dinâmica semelhante ao cálcio.

Na **Tabela 7** estão expressas as médias das concentrações dos nutrientes Ca, Mg, K, Na, AT (alumínio e hidrogênio de troca) e CTC nos solos do ensaio de alfaca.

Quando as relações Ca/Mg são desadequadas podem mostrar solos com problemas nas propriedades físicas, como por uma má permeabilidade. No estudo temos uma relação em  $\text{mg kg}^{-1}$  de 3,24, 3,23, 3,28, 3,53, 3,39 em S, SU, SUB, SUZ e SUBZ,

respectivamente. As relações se enquadram na classificação *média* do LQARS, 2006 com apreciação de *adequada* (variação de 2,6 a 4).

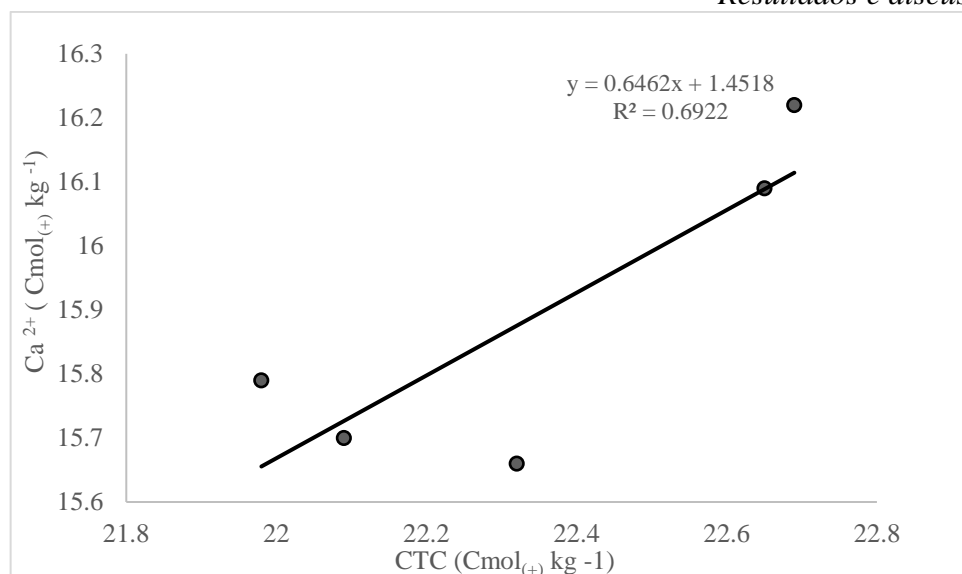
Na troca catiônica do solo neste estudo (**Tabela 7**), nota-se uma maior presença de cálcio em todos os tratamentos, correspondendo a 70,16 %, 71,04 %; 68,22 %; 71,84 %; 71,49% respectivamente aos tratamentos S, SU, SUB, SUZ e SUBZ. O segundo tipo de cátion predominante é o magnésio, seguindo-se o sódio e potássio.

**Tabela 7.** Concentração de cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), acidez de troca (AT) e capacidade de troca catiônica (CTC) presente no solo do ensaio com alface.

Tratamento	Complexo de troca $\text{Cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$					
	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{K}^+$	$\text{Na}^+$	AT	CTC
<b>S</b>	15,66 a $\pm$ 0,57	4,83 a $\pm$ 0,2	0,28 ab $\pm$ 0,03	1,42 a $\pm$ 0,06	0 $\pm$ 0,0	22,32 a $\pm$ 0,41
<b>SU</b>	16,09 a $\pm$ 0,29	4,98 a $\pm$ 0,11	0,21 b $\pm$ 0,01	1,38 a $\pm$ 0,05	0 $\pm$ 0,0	22,65 a $\pm$ 0,44
<b>SUB</b>	15,7 a $\pm$ 0,14	4,79 ab $\pm$ 0,07	0,22 b $\pm$ 0,01	1,38 a $\pm$ 0,05	0 $\pm$ 0,0	22,09 a $\pm$ 0,28
<b>SUZ</b>	15,79 a $\pm$ 0,13	4,47 b $\pm$ 0,16	0,31 ab $\pm$ 0,06	1,42 a $\pm$ 0,03	0 $\pm$ 0,0	21,98 a $\pm$ 0,22
<b>SUBZ</b>	16,22 a $\pm$ 0,38	4,78 b $\pm$ 0,2	0,28 ab $\pm$ 0,06	1,42 a $\pm$ 0,06	0 $\pm$ 0,0	22,69 a $\pm$ 0,46

AT – Acidez de troca a que corresponde a concentração dos íons  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$   
 Na coluna, letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Em relação ao teor de cálcio, não foram registradas diferenças significativas quanto ao teor no solo. A presença de zeólitos parece ter contribuído para alguma imobilização de magnésio, com valores significativamente mais baixos e contribuído para o já referido maior teor em potássio no solo. De qualquer forma a presença dos condicionadores não teve nenhum impacto significativo nos valores de CTC. Os valores de CTC do solo estão relacionados com o seu teor em cálcio, ou seja, é o cálcio que mais contribui para o valor de CTC (**Figura 1**), o que está de acordo com a referência à natureza ultrabásica deste solo, situação corroborada com a classificação de *alto* nos teores de magnésio (classificação de *médio* para valores entre 1,1 e 2,5  $\text{Cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$ ) (LQARS, 2006).



**Figura 1.** Relação entre os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Cálculo do solo da alface.

A **Tabela 8** corresponde aos resultados obtidos no solo após os cinco cortes do azevém. Nesta tabela é possível verificar a mesma tendência de resultados observados após os ciclos de alface. À exceção dos resultados do cátion  $K^+$ , não foram registradas diferenças significativas na concentração dos restantes elementos, nem no valor de CTC. Tal como no caso do ensaio com alface, o cálcio resultante após os cortes de azevém, foi o elemento predominante na CTC, correspondente a valores que aproximam dos 70% da CTC (**Figura 2**).

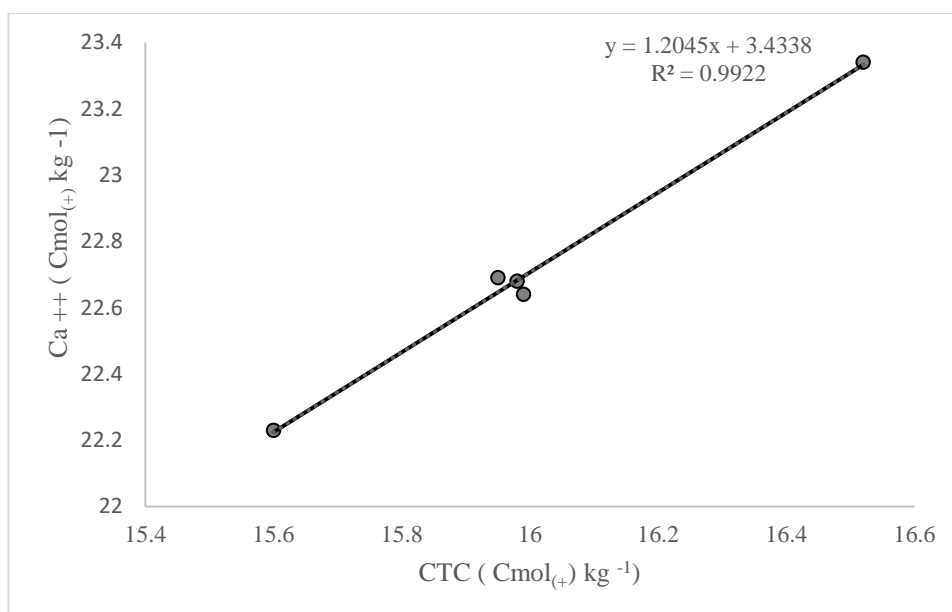
**Tabela 8.** Concentração de cálcio ( $Ca^{2+}$ ), magnésio ( $Mg^{2+}$ ), potássio ( $K^+$ ), sódio ( $Na^+$ ), acidez de troca (AT) e capacidade de troca catiônica (CTC) presente no solo após os cortes do azevém.

Tratamento	Cmol(+) kg <sup>-1</sup>					
	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	AT	CTC
S	15,6 a ± 0,39	4,74 a ± 0,11	0,18 b ± 0,01	1,71 a ± 0,03	0 a ± 0,0	22,23 a ± 0,41
SU	15,98 a ± 0,23	4,77 a ± 0,05	0,16b ± 0,01	1,78 a ± 0,03	0 a ± 0,0	22,68 a ± 0,27
SUB	15,99 a ± 0,62	4,77 a ± 0,06	0,16 b ± 0,01	1,73 a ± 0,02	0 a ± 0,0	22,64 a ± 0,63
SUZ	16,52 a ± 0,74	4,84 a ± 0,21	0,23 a ± 0,03	1,77 a ± 0,08	0 a ± 0,0	23,34 a ± 1,03
SUBZ	15,95 a ± 0,99	4,73 a ± 0,32	0,24a ± 0,03	1,77 a ± 0,08	0 a ± 0,0	22,69 a ± 1,38

Na coluna, letras diferentes indicam diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

À exceção dos resultados do cátion  $K^+$ , não foram registradas diferenças significativas na concentração dos restantes nem no valor de CTC. Tal como no caso do ensaio com alface, o cálcio resultante após os cortes de azevém, foi o elemento

predominante na CTC, correspondente a valores que aproximam dos 70% da CTC (**Figura 2**). O magnésio foi o segundo cátion dominante, seguindo-se o potássio e o sódio. Para potássio os valores significativamente mais elevados foram registrados nos tratamentos com a presença de zeólitos. Como já referido, os valores altos de potássio nos tratamentos com zeólitos, são por conta da composição deste mineral que influencia os resultados.



**Figura 2.** Relação entre os valores de Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e Cálcio (Ca<sup>2+</sup>) (Cmol<sub>(+)</sub> kg<sup>-1</sup>) do solo do azevém.

A CTC pode ser influenciada pela quantidade de argila e matéria orgânica presente no solo, resultando em resultados maiores. A adição do biochar aumenta a quantidade de matéria orgânica no solo, mas, diferente de um resultado esperado, no qual a adição de biochar poderia melhorar a CTC do solo, não se registrou um efeito positivo da presença de nenhum dos condicionadores nesta propriedade do solo. Segundo Rawat *et al.*, (2019) o biochar contribui para o aumento da troca catiônica, retenção dos nutrientes e aumento do pH.

Em estudos de Lima *et al.*, (2016) o crescimento do pimentão adubado com biochar e nitrogênio comprovaram que em determinadas quantidades de biochar as características do solo, e a CTC em particular, melhoraram, tornando os nutrientes mais disponíveis para a planta de pimentão. Porém, neste estudo, não foi obtido este tipo de resultados. A principal justificativa está relacionada com a já naturalmente adequada capacidade de troca catiônica do solo usado. De acordo com LQARS (2006) os valores considerados

normais situam-se entre 10 e 20  $\text{Cmol}_{(+)}$   $\text{kg}^{-1}$ ), pelo que a adição deste tipo de condicionadores nos solos sem limitações químicas aparentes não terá efeito expressivo na melhora da qualidade das propriedades do solo.

### 5.1.5 Micronutrientes

Os micronutrientes são considerados elementos essenciais para a nutrição vegetal e auxiliam no desenvolvimento das plantas (Santos, 2015). Classificados como micronutrientes catiônicos o ferro (Fe), zinco (Zn), cobre (Cu) e manganês (Mn) e micronutrientes aniônicos como o boro (B), estes são absorvidos pela vegetação em pequenas quantidades, pois em excesso podem ter efeitos tóxicos na vegetação (Varenes, 2003).

Na **Tabela 9** é possível observar a média das concentrações dos micronutrientes no solo, após os dois ciclos vegetativos da alfaca.

O boro não registrou diferenças significativas entre tratamentos. Os valores variaram entre 0,66  $\text{mg kg}^{-1}$  em S e 0,99 no tratamento SU, valores que se encontram na gama *adequada*, conforme LQARS (2006). No que respeita ao ferro, os valores foram significativamente diferentes entre os tratamentos S (202,64  $\text{mg kg}^{-1}$ ) e SU (179,12  $\text{mg kg}^{-1}$ ).

**Tabela 9.** Concentração média de Boro (B), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) presente no solo das alfacas após dois ciclos.

Tratamento	Micronutrientes $\text{mg kg}^{-1}$				
	B	Fe	Zn	Cu	Mn
S	0,66 a $\pm$ 0,25	202,64 a $\pm$ 10,45	5,04 a $\pm$ 0,05	47,9 a $\pm$ 11,23	226,96 a $\pm$ 44,7
SU	0,99 a $\pm$ 0,15	179,12 b $\pm$ 6,33	4,56 b $\pm$ 0,24	32,24 ab $\pm$ 5,21	181,12 ab $\pm$ 27,18
SUB	0,83 a $\pm$ 0,25	192,36 ab $\pm$ 1,28	4,86 ab $\pm$ 0,25	27,84 ab $\pm$ 6,84	154,96 b $\pm$ 26,89
SUZ	0,80 a $\pm$ 0,19	192,16 ab $\pm$ 6,45	4,7 ab $\pm$ 0,2	21,6 b $\pm$ 5,94	162,67 ab $\pm$ 32,03
SUBZ	0,74 a $\pm$ 0,29	192,24 ab $\pm$ 7,46	4,9 ab $\pm$ 0,19	26,37b $\pm$ 15,12	154,22 b $\pm$ 27,28

Na coluna, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Também foram estes tratamentos que registraram os valores mais alto e mais baixo de zinco, com diferenças significativas entre si: 5,04 no tratamento S e 4,56  $\text{mg kg}^{-1}$  no tratamento SU. Os valores de cobre foram mais baixos nos tratamentos com zeólitos, tendo variado entre 47,9  $\text{mg kg}^{-1}$  no tratamento S e 21,6  $\text{mg kg}^{-1}$  no tratamento SUZ,

sendo estes valores significativamente diferentes. Seguindo a mesma tendência, o valor de manganês foi mais elevado no tratamento S (226,96 mg kg<sup>-1</sup>), valor significativamente diferente dos valores registrados nos tratamentos com biochar (cerca de 154 mg kg<sup>-1</sup>) (**Tabela 9**).

Em resumo, os valores mais elevados de micronutrientes catiônicos no solo verificaram-se no tratamento testemunha, que não levou ureia nem condicionadores do solo. Este resultado pode ser devido a menor exportação por parte das plantas que tiverem menor produção e por outro pela falta de um complemento condicionador que reduzisse a sua disponibilidade. De alguma forma parece haver uma afinidade específica associada ao biochar para o cobre e manganês, embora a presença de ambos tenha genericamente reduzido a disponibilidade destes elementos.

Na **Tabela 10**, estão expressos os valores médios de micronutrientes do solo após os cortes do azevém.

Neste ensaio, o tempo de ocupação do solo com a cultura induziu algumas diferenças. Os valores de boro não foram estatisticamente diferentes entre tratamentos, encontrando-se na mesma ordem de grandeza dos verificados no ensaio de alface, embora com o valor no tratamento SU um pouco superior. No que respeita ao ferro verificou-se um aumento generalizado na quantidade disponível no solo relativamente ao ensaio com alface, o mesmo tendo acontecido ao manganês. A cultura permaneceu sempre no solo sem interrupções. A rega dos vasos deverá ter proporcionado fenômenos de redução ao ferro, contribuindo para uma maior disponibilidade deste elemento no solo (Weil e Brady, 2017). O zinco e o cobre diminuíram na sua quantidade provavelmente devido a fenômenos associados com a absorção pelas plantas.

**Tabela 10.** Concentração média de Boro (B), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Ferro (Fe) e Manganês (Mn) presente no solo após os cortes de azevém.

Tratamento	Micronutrientes mg kg <sup>-1</sup>				
	B	Fe	Zn	Cu	Mn
S	0,57 a ± 0,26	365,25 a ± 39,31	4,43 a ± 0,02	13,74 a ± 3,87	274,9 a ± 71,42
SU	1,08 a ± 0,48	366,46 a ± 26,38	3,36 b ± 0,24	14,69 ab ± 2,63	317,04 a ± 45,94
SUB	0,77 a ± 0,40	361,64 a ± 37,82	3,10 b ± 0,39	12,89 ab ± 4,01	271,43 a ± 74,61
SUZ	0,52 a ± 0,17	341,85 a ± 14,88	3,31 b ± 0,48	11,91 b ± 1,54	234,66 b ± 53,01
SUBZ	0,76 a ± 0,37	315,49 a ± 20,32	3,79 ab ± 0,223	13,89 b ± 1,29	245,27 ab ± 30,61

Na coluna, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Para o ferro, o uso dos condicionadores nos tratamentos SUB, SUZ e SUBZ, tiveram a mesma dinâmica do boro. O maior valor foi na ureia com  $366,46 \text{ mg kg}^{-1}$ , e o menor valor em SUBZ com  $315,49 \text{ mg kg}^{-1}$ .

A concentração de zinco após os cinco cortes, teve maior resultado na testemunha S, com  $4,43 \text{ mg kg}^{-1}$ , o menor valor foi no SUB ( $3,10 \text{ mg kg}^{-1}$ ), e a união dos condicionadores SUBZ, teve o segundo melhor valor com  $3,79 \text{ mg kg}^{-1}$ . Os valores entre SU, SUB e SUZ, não tiveram diferenças significativas, os tratamentos S e SUBZ, houve diferenças.

A ureia sozinha (SU), novamente teve melhor resultado em relação ao cobre, o melhor resultado entre os tratamentos foi obtido em SU com  $14,69 \text{ mg kg}^{-1}$ , porém, sem diferenças significativas com SUB ( $12,89 \text{ mg kg}^{-1}$ ). Novamente a combinação dos condicionadores teve bom resultado comparados com os tratamentos, com  $13,89 \text{ mg kg}^{-1}$ .

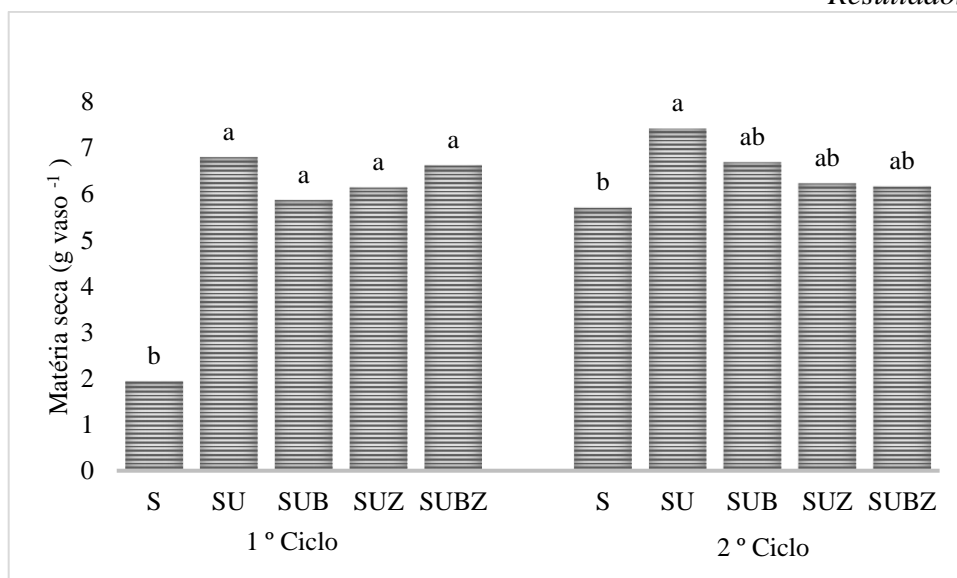
Por fim, no manganês, a ureia isolada teve dinâmica parecida com ao cobre, resultado no maior valor entre os tratamentos, com  $317,04 \text{ mg kg}^{-1}$  e menor valor quando adicionado zeólitos no tratamento SUZ ( $234,66 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Como já referido nesse estudo, o pH é o grande influenciador das concentrações de macro e micronutrientes, pH próximo a neutralidade 6 a 6,5 pode ter uma disponibilidade máxima dos macronutrientes. Neste trabalho, os valores de pH conforme a **Tabela 2**, os valores de pH estiveram dentro desse limite.

Nos resultados não se verificou uma lógica para a disponibilidade de nutrientes com os condicionadores, e sim que, dependendo do nutriente, pode haver uma dinâmica diferente destes com os condicionadores isolados ou em conjunto. Por vezes, em conjunto, obteve-se maior concentração dos nutrientes no solo devido a um eventual efeito aditivo destes na liberação dos nutrientes. Outro fator que pode também estar associado é a própria composição e propriedades dos condicionadores bem como os processos associados à mineralização da matéria orgânica.

## 5.2 PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DA ALFACE

Na **Figura 3** podem ser observados os valores médios da produção de matéria seca nos dois ciclos da alface.



**Figura 3.** Matéria seca produzida nos dois ciclos da alfaca em cada tratamento que estas foram submetidas. Para cada ciclo, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

No primeiro ciclo, não houve diferenças significativas na produção entre os tratamentos contendo ureia e os condicionadores. Apenas o tratamento testemunha teve uma produção significativamente menor. O tratamento com apenas ureia (SU) se sobressaiu, com uma produção média de 6,8 g/vaso. O tratamento testemunha (S) apresentou uma produção média de 4,86 g /vaso. O uso de condicionadores isolados com a ureia obteve resultados com valores menores, quando aplicado apenas ureia. Pode-se entender que essa dinâmica seja resultado de uma imobilização da ureia pelo biochar e zeólito.

No segundo ciclo, a produção variou entre 5,7 e 7,42 g /vaso em S e SU respectivamente, tendo sido estes tratamentos significativamente diferentes entre si. O valor de produção mais elevada em SU justifica-se possivelmente porque a hidrólise da ureia resultou num aumento da disponibilidade do nitrogênio que ficou mais disponível para a alfaca.

Os resultados com condicionadores não foram significativamente diferentes, mas nota-se a influência da sua presença na redução da disponibilidade de nitrogênio pois há uma tendência para a redução da produção associada à sua presença.

No geral, no segundo ciclo os resultados da produção foram de valores maiores, com especial destaque para a produção no tratamento SU. A temperatura pode ter sido grande influenciadora nessa diferença do primeiro e segundo ciclo. Na época do primeiro

ciclo (outubro – dezembro), as temperaturas médias para Bragança, foram de 5,5 °C e 14,2°C de mínima e máxima, respectivamente. No segundo ciclo (março – maio) 7,6°C e 19,1°C de mínima e máxima, respectivamente. Sabe-se que temperaturas entre 15 e 20 ° são ideais para o cultivo da hortaliça. Então, as temperaturas mais elevadas no segundo ciclo aceleraram o metabolismo da planta, processo que se refletiu numa maior quantidade de matéria seca por vaso. A temperatura influencia também a atividade microbiana promovendo a mineralização da matéria orgânica o que contribuiu para o aumento da produção também no tratamento S relativamente ao primeiro ciclo. Este efeito foi particularmente visível no tratamento S já que a produção do 2º ciclo da alface foi significativamente superior. As condições ambientais também tiveram influência na atividade enzimática que contribuiu para a degradação da ureia aumentando a disponibilidade de N para as plantas.

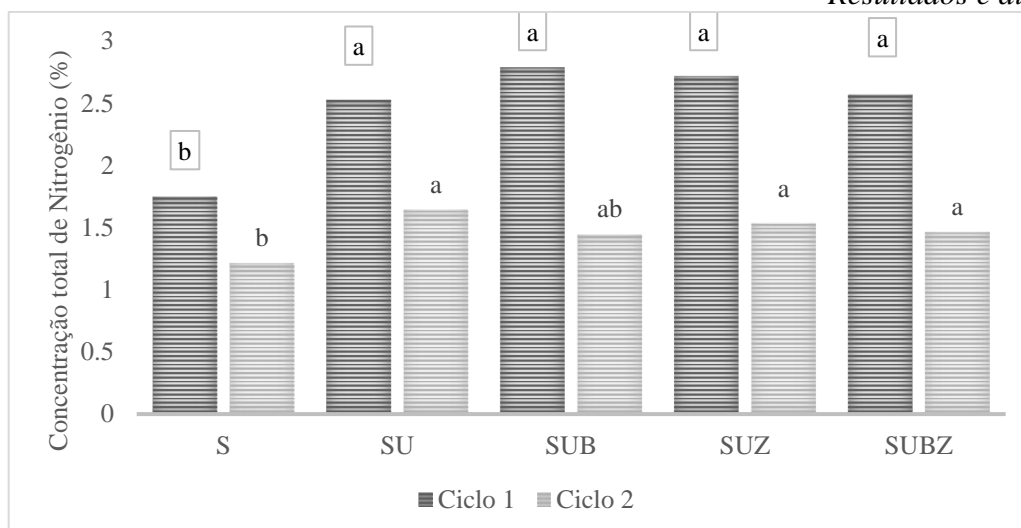
A maior quantidade de matéria seca no segundo ciclo, pode ser entendida também pelo fato de os condicionadores terem retido os nutrientes do solo e aos poucos estes nutrientes vão sendo novamente disponibilizados funcionando então os condicionadores como fertilizantes de liberação lenta. Este efeito foi já registrado em estudos de outros autores.

Estudos de Petter *et al.*, (2012), com o objetivo de avaliar o efeito do biochar com outros substratos para o desenvolvimento da alface, concluíram que a adição de biochar não teve influência significativa na massa seca. Concluíram também que a adição de biochar ao substrato usado numa proporção até 15 % usado, pode ser uma alternativa boa. Porém, valores superiores, podem prejudicar a produção das mudas por excessiva imobilização de nutrientes.

### 5.3 CONCENTRAÇÃO DE MACRONUTRIENTES NOS TECIDOS VEGETAIS

#### 5.3.1 Nitrogênio

A **Figura 4** mostra a concentração de nitrogênio nos tecidos da alface no primeiro e segundo ciclos. Nesta figura observa-se que no primeiro ciclo as concentrações de nitrogênio na matéria seca foram superiores, quando comparadas ao segundo ciclo.



**Figura 4.** Concentração de nitrogênio nos dois ciclos da alfaca e em cada tratamento. Para cada ciclo, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

O menor resultado do primeiro ciclo correspondente a 1,75%, foi registrado no tratamento S, significativamente diferente dos restantes. Este resultado é entendido pelo fato de nesse tratamento não ter sido adicionado nitrogênio na forma de ureia, sendo por isso menor o seu valor. A maior concentração foi verificada no tratamento SUB (2,79%). Os tratamentos com condicionadores isolados SUB e SUZ, mostram um pequeno aumento na concentração de nitrogênio, porém, estatisticamente não significativos. Já a combinação dos condicionadores no tratamento SUBZ, mostrou um pequeno decréscimo na concentração. Estas variações na concentração de nitrogênio estão diretamente relacionadas com a produção (**Figura 3**). Nas produções mais baixas dos tratamentos fertilizados há uma concentração maior de nitrogênio nos tecidos, enquanto o aumento da produção resulta num efeito de diluição do nutriente numa maior quantidade de massa, que resulta numa menor concentração. Este é um efeito bem conhecido (Marscher, 2012).

No segundo ciclo a concentração de N variou entre 1,21% da matéria seca no tratamento S e 1,64% no tratamento SU. Desta vez, a concentração de N na matéria seca da alfaca em S não diferiu significativamente da concentração no tratamento SUB, mas diferiu da concentração deste elemento nos restantes tratamentos. Globalmente, a concentração de N nos tecidos da alfaca dos diferentes tratamentos foi inferior aos valores obtidos no primeiro ciclo. No geral, o comportamento dos condicionadores foi semelhante ao registrado no primeiro ciclo, embora se verifique uma eventual redução da quantidade de N disponível no tratamento associado à aplicação de biochar SUB.

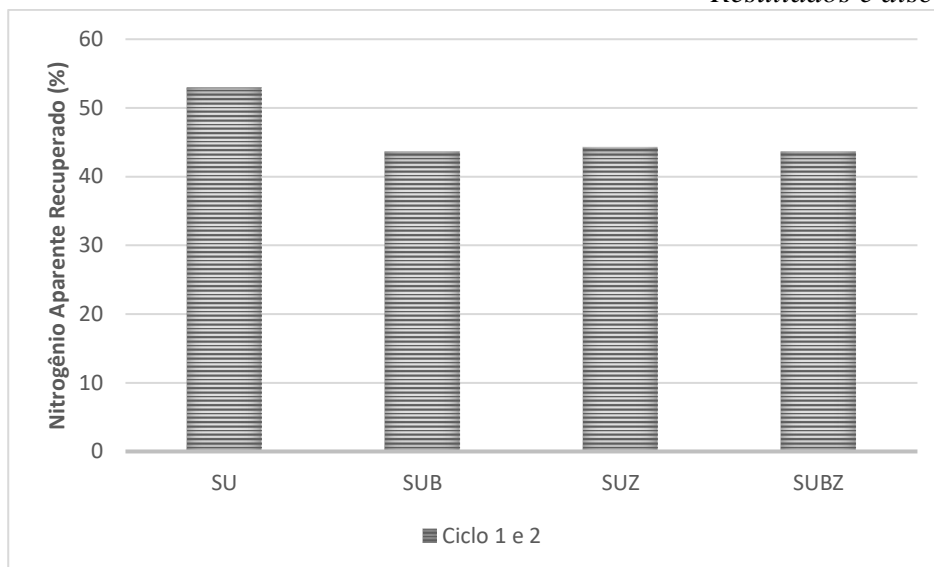
Em trabalhos de Liu *et al.*, (2017), verificou-se que a adição de biochar não resultou em resultados significativamente superiores na quantidade de nitrogênio nas plantas. No entanto, o biochar contribuiu para menores perdas de nitrogênio e maior retenção desse elemento no solo, o que parece estar de acordo com os resultados neste segundo ciclo de alface.

No primeiro ciclo o biochar contribuiu para a maior concentração do nitrogênio na alface. Porém, Chan e Xu (2009), afirmam que o biochar pode ter diferentes variáveis em relação a disponibilidade de nutrientes de acordo com o seu processo de formação como as condições da pirólise ou o tipo de matéria prima, o que sugere a possibilidade da existência de diferentes tipos de resposta das culturas à incorporação deste tipo de condicionadores ao solo. De notar que o biochar também serve como habitat para microrganismos participantes das transformações de nitrogênio, fósforo e enxofre (DeLuca *et al.*, 2009), o que pode ter contribuído para um melhor teor de N nos tecidos no tratamento SUB.

A presença de zeólitos mostrou um efeito similar ao da presença de biochar em ambos os ciclos da alface. Conforme Bernardi *et al.*, (2008) os zeólitos quando adicionados com fertilizantes podem melhorar propriedades do solo, resultando em maior capacidade de retenção de nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Os menores valores de N associados também à presença de zeólitos deverão estar relacionados com este fenômeno de imobilização.

Em trabalhos de Resende *et al.*, (2016) com objetivo de avaliar o efeito do uso de zeólitos em quantidades distintas de ureia, demonstraram que o uso desse condicionador não teve resultados significantes quando se fala na volatilização da amônia. Entretanto, em estudos com milho, foi demonstrado que o uso de zeólitos resultou num melhor aproveitamento do nitrogênio pela produção e em pequenas perdas por lixiviação. Nestes estudos conclui-se ainda que doses excessivas de nitrogênio não são necessárias no cultivo das culturas (Andrade *et al.*, 2011).

Na **Figura 5**, apresentam-se os resultados da aplicação da **Equação 8** para entender a quantidade de Nitrogênio recuperado pela cultura.



**Figura 5.** Nitrogênio aparentemente recuperado em relação ao tratamento S para os dois ciclos da Alface.

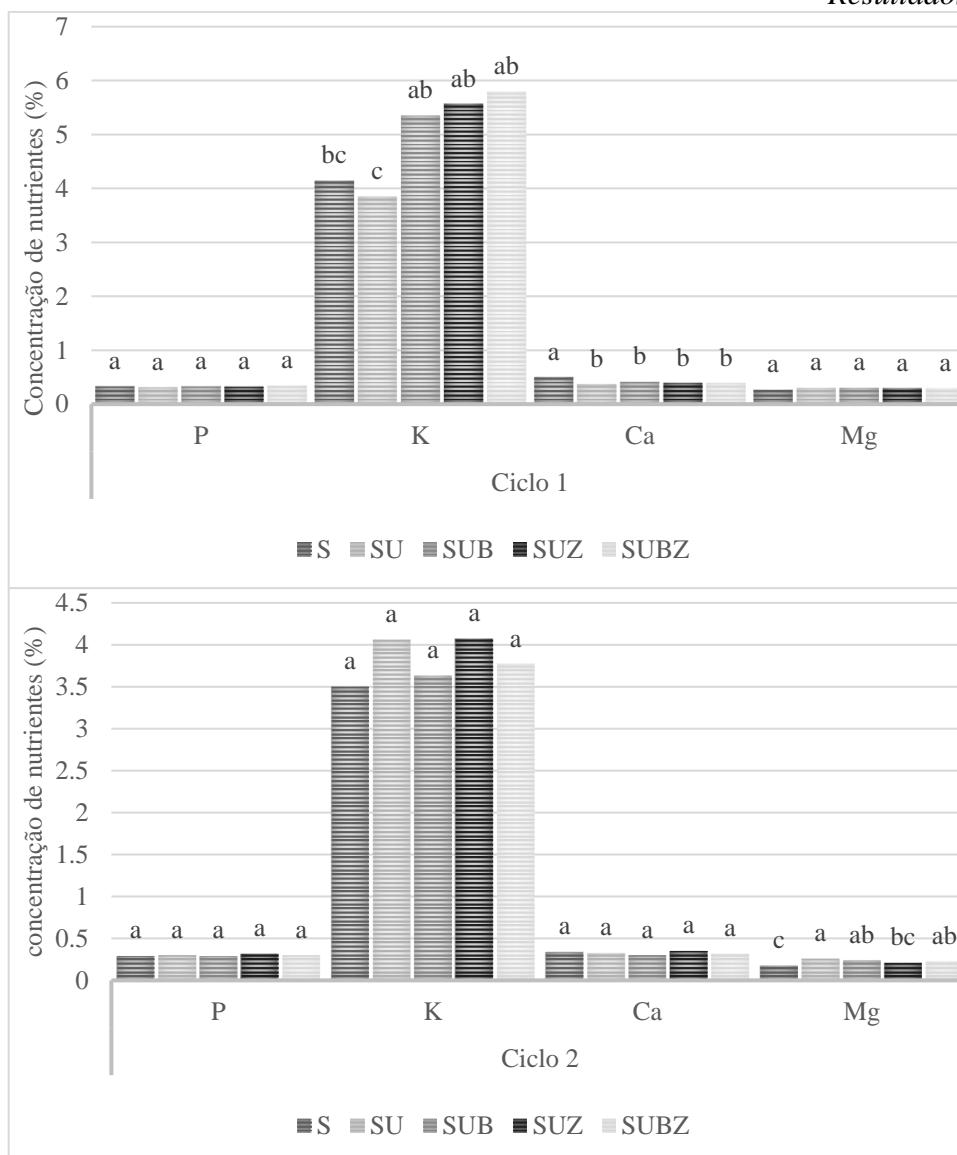
A adição dos condicionadores demonstra uma pequena imobilização do nitrogênio. No tratamento SU registrou-se a maior taxa de recuperação de N com 53,0%. O resultado é justificado por conta que esse tratamento não possui nenhum agente de imobilização dos íons nitrogenados disponibilizados após hidrólise da ureia. O menor valor de NAR verificou-se na associação dos condicionadores SUBZ, com 43,65%, valor pouco distinto de SUB com 43,66 %, o que sugere um papel mais claro do biochar na imobilização do nutriente. No tratamento com zeólito isolado (SUZ) NAR teve um valor ligeiramente superior, de 44,3%.

Liu *et al.*, (2017) estudaram o efeito do biochar no solo e em culturas, combinado com ureia, os resultados mais significativos mostraram que a adição do biochar contribuiu para o aumento de biomassa produzida e que houve aumento da retenção de nitrogênio. Do ponto de vista estatístico, não se verificou incremento de N da ureia para a planta. Contudo, concluíram que o biochar pode contribuir para um rendimento vegetal satisfatório, com menor lixiviação de nitrogênio.

Conforme Rawat *et al.*, (2019) o biochar pode aumentar a disponibilidade dos micronutrientes que será libertado posteriormente de forma lenta para a planta, resultando num bom condicionador que limita a perda de nutrientes por lixiviação.

### 5.3.2 Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio

Nos dois ciclos da alface, o macronutriente potássio se destacou, com a maior concentração entre os outros macronutrientes, conforme a **Figura 6**.



**Figura 6.** Concentração média de fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na matéria seca da alfalfa ciclos 1 e 2. Para cada nutriente, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação múltipla de médias de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

No primeiro ciclo a concentração variou entre 3,85% da matéria seca em SU, valor significativamente inferior ao dos tratamentos com aplicação de condicionadores. O valor mais elevado foi verificado no tratamento SUBZ com 5,79% e 5,56% no tratamento SUZ. No tratamento S, o valor de K mais elevado que o do tratamento SU também deve estar relacionado com o efeito de concentração do nutriente em menor quantidade de biomassa. No segundo ciclo as concentrações do nutriente foram substancialmente mais baixas que as do primeiro ciclo, com o valor máximo de 3,77% registrado em SUBZ, ainda que sem diferenças significativas para os restantes tratamentos. A aplicação de

zeólitos contribuiu para o aumento do potássio nos tecidos estando a sua presença relacionada com os maiores valores de K nos tecidos.

Conforme Polat *et al.*, (2004), os zeólitos aumentam a capacidade de retenção de nutrientes na zona das raízes, principalmente de nitrogênio e potássio. De acordo com Santos (2015), o potássio é um dos macronutrientes mais absorvidos pela planta, variando de 1 a 5 % da matéria seca.

Os zeólitos, de carga dominante negativa, atraem os cátions positivos, como o potássio ou grupos carregados positivamente, assim os cátions metálicos alcalinos e do solo, são atraídos e adsorvidos pelos zeólitos assim como a água. Os cátions têm grande mobilidade, justificada por sua fraca atração pela fase sólida do solo e podem ser substituídos por outros íons. Assim, os zeólitos são bons trocadores de íons (Polat *et al.*, 2004).

Bernardi *et al.*, (2005), testaram a aplicação de zeólitos na cultura da alface e concluíram que este condicionador pode ser uma boa alternativa para o aumento da eficiência de uso de nitrogênio, fósforo e potássio o que resulta em maior produção desta cultura. Estes autores também verificaram a existência de correlações positivas e significativas entre os teores de potássio nos tecidos da alface e os teores de potássio nos tratamentos com zeólitos. Os valores mais elevados de potássio associados aos zeólitos estão relacionados com a sua própria composição neste elemento, como já foi referido. Considerando a sua constituição, os zeólitos vão disponibilizando potássio ao longo do tempo para o solo e, por consequência, para as culturas.

Conforme LQARS (2006), os níveis adequados em percentual de potássio para a alface variam entre 5,5 e 7,0% da matéria seca. Nesta perspectiva, neste estudo, os tratamentos S e SU, não originaram níveis adequados de potássio para a planta, resultando em 4,14 e 3,85%, respectivamente. Contudo, com a adição dos condicionadores, os resultados foram adequados, com 5,35, 5,56 e 5,79% da matéria seca, nos tratamentos SUB, SUZ e SUBZ, respectivamente.

O fósforo não mostrou diferenças significativas entre tratamentos em nenhum dos dois ciclos. Os valores andaram à volta de 0,3% da matéria seca. Sabe-se que o fósforo é um elemento pouco absorvido pela planta, a julgar pela concentração deste nutriente relativamente à dos restantes macronutrientes. No entanto, trata-se de um macronutriente essencial para a planta, pois atua no metabolismo da planta nomeadamente como

constituente de moléculas energéticas como o ATP. Também pode estar relacionado com o aumento do sistema radicular que faz com que a planta capte mais nutrientes e água do solo, justificando a aplicação do fósforo como fertilizante em culturas (Santos, 2015). Além disso, temperaturas baixas do solo, podem interferir na absorção deste nutriente (Santos, 2015), e isso pode ser uma das justificativas para os baixos valores de fósforo nos dois ciclos.

De acordo com LQARS (2006), os níveis adequados de fósforo na alface variam entre 0,4 a 0,8 %, e por isso considera-se que os valores deste estudo, estão abaixo do adequado. Deve, no entanto, notar-se que os teores de nutrientes considerados normais para uma cultura variam muito com a variedade dessa cultura.

Para cálcio, o valor mais elevado (0,5%) da matéria seca, registrou-se no tratamento S no primeiro ciclo de alface, valor significativamente diferente dos restantes tratamentos que não diferiram entre si. Para os restantes tratamentos registaram-se os valores 0,37%, 0,42, 0,39% e 0,39%, para SU, SUB, SUZ e SUBZ, respectivamente. O biochar nesse caso, contribui para o aumento na quantidade de cálcio, resultado esperado pois na queima de biomassa, as cinzas contêm minerais, como o cálcio, magnésio e carbonatos inorgânicos (Lehmann e Joseph, 2009).

Os níveis de cálcio em todos os tratamentos, foram inferiores a valores estipulados como adequados por LQARS, (2006), apesar dos valores naturalmente elevados no solo. Como o valor mais elevado foi registrado no tratamento S, é possível que os valores mais baixos dos outros tratamentos estejam relacionados com fenômenos de imobilização por parte dos condicionadores.

No que respeita ao magnésio, os teores também naturalmente elevados no solo não permitiram verificar diferenças significativas entre os tratamentos no primeiro ciclo de alface, andando os valores por volta de 0,3% da matéria seca. No segundo ciclo os valores foram em geral mais baixos que no primeiro ciclo, tendo variado entre 0,18% em S e 0,26% em SU. Este valor mais elevado em SU deve estar relacionado com maior disponibilidade do nutriente no solo neste tratamento sem a presença de condicionadores.

O magnésio é o único mineral que participa da constituição da clorofila, sendo por isso indispensável para as plantas. Comparado com o nitrogênio e o potássio, a sua proporção na planta também é bem menor, variando de 0,1 a 0,4 % da matéria seca. Conforme o LQARS (2006) os índices adequados de magnésio para a alface variam de

0,4 a 0,8, concluindo que os níveis do segundo ciclo, assim como o primeiro, se encontram em níveis deficientes.

Com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de biochar e zeólitos na diminuição da biodisponibilidade de metais pesados em alfaces Silva (2018) teve resultados similares de potássio na alface em tratamentos com a presença de zeólitos, mostrando que este condicionador contribuiu em sua disponibilidade para a planta. No que respeita ao fósforo e cálcio, os valores também foram deficientes comparados com os de LQARS (2006). É de admitir também para este trabalho uma eventual questão com a variedade da alface usada.

### 5.3.3 CONCENTRAÇÃO DE MICRONUTRIENTES NOS TECIDOS VEGETAIS

Na **Tabela 11** estão manifestados os resultados obtidos das concentrações dos micronutrientes no tecido vegetal da alface. No primeiro ciclo, os valores de boro variaram entre 27,24 mg kg<sup>-1</sup> em S e 32,54 mg kg<sup>-1</sup> em SUZ, S e SU não diferiram entre si, tendo sido os tratamentos com valores mais baixos. Os condicionadores deverão ter contribuído com algum boro para as plantas. No segundo ciclo não se verificaram diferenças significativas entre tratamentos, tendo os valores aproximado as 30 mg kg<sup>-1</sup>. Os resultados obtidos enquadraram-se nos limites de 25 a 60 mg kg<sup>-1</sup>, conforme o manual LQARS (2006).

No primeiro ciclo, o ferro foi o micronutriente predominante na matéria seca da alface, em especial no tratamento com a combinação dos condicionadores – SUBZ, com 1388 mg kg<sup>-1</sup>. Porém não houve diferenças significativa entre os outros tratamentos. Saliente-se que as doses de ferro na constituição da matéria seca da alface não são tão significantes, conforme Junior *et al.*, (2016). Sabe-se que as cinzas do biochar podem conter óxidos de ferro e isso pode ter contribuído para que o tratamento SUB, tenha tido o segundo maior valor. A combinação dos condicionadores pode ter contribuído para maior absorção desse nutriente pela alface. Parte da explicação para estes valores poderá estar também no fato de no processo de rega da alface durante o inverno não se ter verificado a evaporação adequada da água aplicada que poderá ter favorecido os fenômenos de redução do ferro, tornando-o mais disponível para a absorção pelas plantas.

No segundo ciclo os valores diminuíram de forma significativa, devido, entre outros fenômenos, à oxidação do ferro. De acordo com LQARS (2006), os níveis adequados de ferro para a alfaca, variam de 40 a 100 mg kg<sup>-1</sup>, sendo os resultados obtidos muito superiores a isso.

**Tabela 11.** Concentração média de Boro (B), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e Cobre (Cu) nos tecidos da alfaca.

<b>Micronutrientes mg kg<sup>-1</sup>, Ciclo 1</b>					
<b>Tratamento</b>	<b>B</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>
<b>S</b>	27,24 b	647 b	53,15 b	60,14 a	13,31 a
<b>SU</b>	28,22 b	1158 a	64,9 ab	78,91 a	16,46 a
<b>SUB</b>	32,36 a	1166 a	58,83 ab	66,44 a	16,56 a
<b>SUZ</b>	32,54 a	1075 a	57,58 ab	76,41 a	15,6 a
<b>SUBZ</b>	29,06 ab	1388 a	70,69 a	64,24 a	15,37 a
<b>Micronutrientes mg kg<sup>-1</sup>, Ciclo 2</b>					
<b>Tratamento</b>	<b>B</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Cu</b>
<b>S</b>	28,07 a	199,34 a	36,14 b	26,44 b	7,99 b
<b>SU</b>	30,42 a	195,13 a	47,95 ab	30,23 a	9,9 a
<b>SUB</b>	30,55 a	146,48 a	46,79 ab	28,54 ab	9,35 ab
<b>SUZ</b>	31,76 a	160,74 a	46,8 ab	31,33 a	9,05 ab
<b>SUBZ</b>	30,73 a	188,1 a	52,65 a	28,58 ab	10,14 a

Na coluna, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de tukey hsd ( $\alpha=0,05$ ).

No que respeita ao zinco, este foi o segundo micronutriente mais representado na matéria seca, também com maior concentração no primeiro ciclo. Neste ciclo não se verificaram diferenças significativas entre tratamentos e o maior valor foi registrado no tratamento SU com 78,91 mg kg<sup>-1</sup>. De acordo com LQARS (2006), os níveis desse micronutriente encontram-se em níveis adequados, estando dentro do intervalo de 11 a 250 mg kg<sup>-1</sup>.

No primeiro ciclo, o cobre não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos. Contudo, no tratamento com biochar SUB, obteve-se a maior concentração desse elemento, de 16,56 mg kg<sup>-1</sup>. Os níveis desse elemento também foram classificados como adequado conforme LQARS (2006). À semelhança dos outros nutrientes, também se verificou uma diminuição da concentração deste metal nos tecidos no segundo ciclo da alfaca. Como já foi referido, os valores menores podem estar relacionados com alguma

dinâmica relacionada com fenômenos de adsorção e liberação dos metais por parte dos condicionadores.

## 5.4 AZEVÉM

### 5.4.1 Produção de matéria seca

Na **tabela 12**, são apresentados os resultados obtidos na produção de matéria seca em cada corte do azevém.

**Tabela 12.** Matéria seca produzida nos cinco cortes do azevém em cada tratamento

Tratamentos	Matéria seca (g/vaso)					
	Corte 1	Corte 2	Corte 3	Corte 4	Corte 5	Acumulativo
S	1,03 b	0,79 c	1,22 b	1,36 a	2,18 c	6,58 c ± 0,69
SU	3,86 a	3,39 a	1,99 a	1,26 a	3,28 a	13,77 a ± 0,44
SUB	3,36 a	3,00ab	1,95 a	1,28 a	2,75 b	12,34 b ± 0,27
SUZ	3,9 a	2,89 b	1,79 a	1,37 a	2,85 b	12,79 ab ± 0,95
SUBZ	3,36 a	2,58 b	1,65 ab	1,25 a	2,64 b	11,47 b ± 0,7

Na coluna, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de tukey hsd ( $\alpha=0,05$ ).

No primeiro corte não se verificaram diferenças significativas entre os tratamentos SU, SUB, SUZ, SUB. O tratamento S mostrou o valor de produção de matéria seca significativamente mais baixo (1,03 g/vaso). A ureia contribui para o maior valor (3,86 g/vaso).

Esta produção em S significativamente mais baixa manteve-se no segundo corte, mas as diferenças foram desaparecendo ao longo do tempo. No segundo corte o tratamento S continua a ser o menor valor de 0,79 g/vaso. O valor de produção mais elevado verificou-se no tratamento SU com 3,39 g/vaso, valor que não diferiu significativamente do obtido em SUB. Os tratamentos com zeólitos (SUZ e SUBZ) foram significativamente superiores a S e significativamente inferiores a SU e SUB.

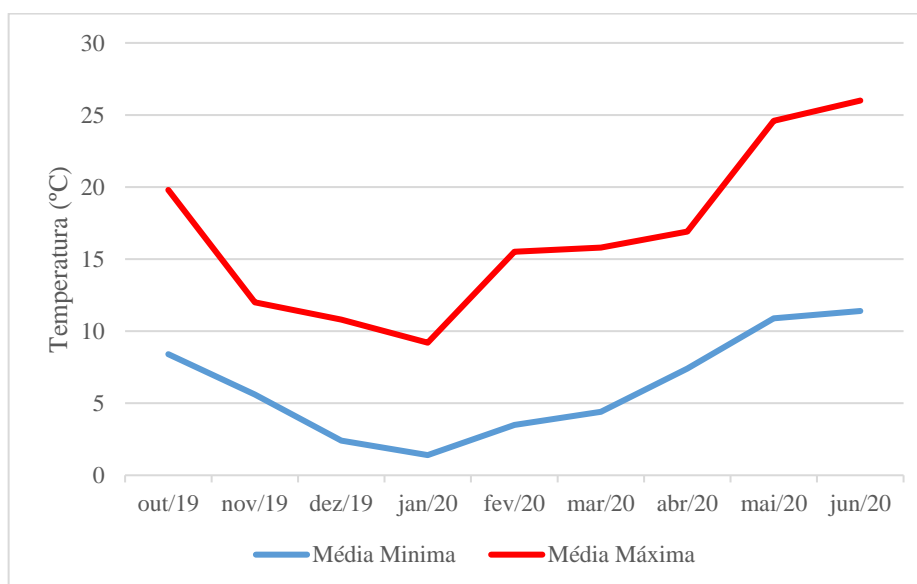
Os valores de matéria seca por vaso, no terceiro corte, nos tratamentos SU, SUB, SUZ e SUBZ, reduziram, comparados aos cortes anteriores. Porém, no tratamento S, houve um aumento médio de 0,43 g/vaso para um valor total de 1,22 g/vaso. Mesmo assim, o tratamento SU continuou com o melhor valor de produção (1,99 g/vaso), seguido do SUB, com 1,95 g/vaso. Nos tratamentos SU, SUB, SUZ não houve diferenças significativas, as diferenças foram em S e SUBZ.

### *Resultados e discussões*

No penúltimo corte, a matéria seca do tratamento S, continuou a aumentar, agora com 1,36 g/vaso, diferentes dos outros cortes em que SU se destacou com a maior quantidade de matéria seca, nesse corte, o tratamento SUZ se sobressaiu com 1,37 g/vaso, mas nesse corte não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

Por fim no 5º e último corte, o valor de matéria seca em S, teve o melhor resultado comparado com os todos cortes neste tratamento, valor de 2,18 g/vaso, mas significativamente inferior à produção dos restantes tratamentos. Verificou-se um aumento da produção no último corte em todos os tratamentos, em comparação com a dos terceiro e quarto cortes. Também nesta data (02 de junho de 2020) o tratamento SU se destacou com maior quantidade de matéria seca (3,28 g/vaso), valor significativamente superior ao dos restantes. A produção dos tratamentos com condicionadores não diferiu estatisticamente entre si. O tratamento SUZ, teve uma produção média de 2,85 g/vaso.

A produção de matéria seca foi influenciada pelo clima, como já citado nesse estudo. O azevém é uma planta que resiste a temperaturas baixas, mas temperaturas próximas de 20 ° C podem favorecer um bom desenvolvimento. A **Figura 7** mostra a variação da temperatura média mínima e média máxima durante o período do estudo.

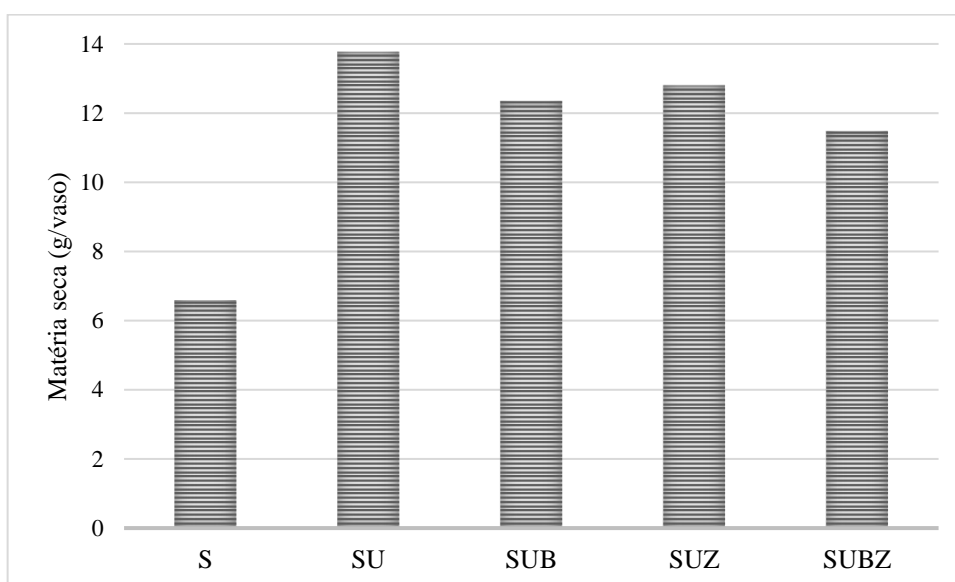


**Figura 7.** Temperatura no período em que foi realizado este estudo, dados obtidos por IPMAR, 2020.

No período deste trabalho, durante o período dos cortes do azevém, verificou-se mudança de estação e consequentemente variações de temperaturas, passando do outono, inverno e primavera. Pode considerar-se alguma controvérsia, pois após o segundo corte,

o desenvolvimento do azevém ocorreu em dezembro até fevereiro, com as temperaturas mais baixas, conforme a **Figura 7**. Porém, os valores mais altos de produção podem ser devidos à existência de nutrientes do início do experimento. Contudo, as temperaturas podem ter influenciado no último corte, já que, os valores foram superiores aos dois cortes anteriores. Possivelmente, além da temperatura ajudar no desenvolvimento do azevém, também contribuiu para a degradação da ureia e por isso para maior disponibilidade do nitrogênio. É importante ressaltar que o trabalho foi realizado dentro de estufa onde, embora o ambiente seja mais protegido, também recebe influência das alterações de temperatura que ocorrem no exterior uma vez que a proteção se restringe à cobertura da estufa.

Na **Figura 8** observa-se o efeito dos condicionadores na produção total de matéria seca. Globalmente, o azevém responde de forma significativa à aplicação de N na forma de ureia já que S teve o valor médio de produção significativamente mais baixo (6,79 g/vaso). O tratamento só com ureia, SU, teve a produção mais elevada, com 13,67 g/vaso. A presença de condicionadores resultou em produções mais baixas, sobretudo na associação de biochar e zeólitos (11,47 g/vaso) muito provavelmente devido a fenômenos de imobilização dos íons nitrogenados por parte destes compostos.

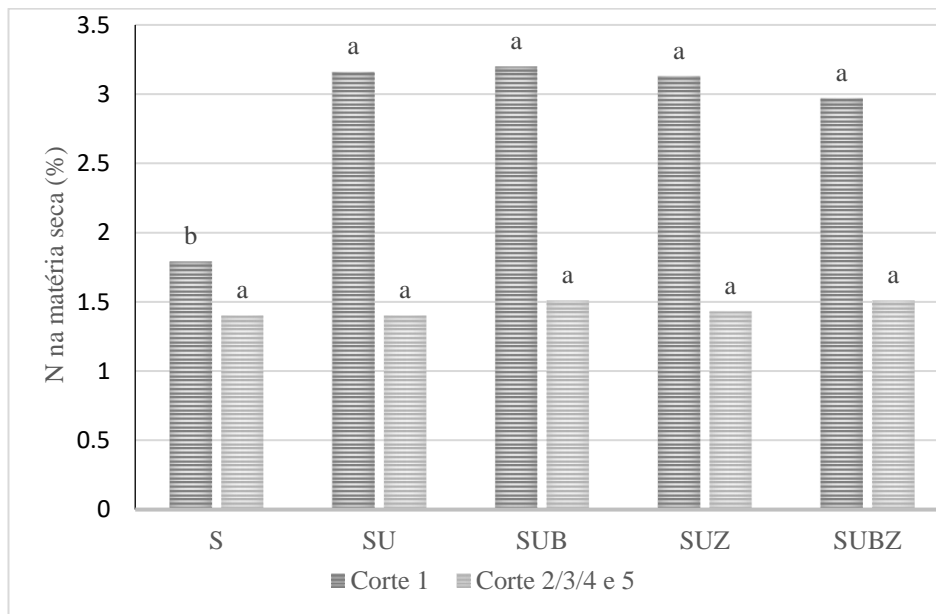


**Figura 8.** Acumulativo da matéria seca g/vaso dos cortes do azevém.

## 5.4.2 Concentração de macronutrientes nos tecidos vegetais

## 5.4.2.1 Nitrogênio

A análise aos tecidos do azevém foi efetuada em dois momentos: na matéria seca do primeiro corte, e na matéria seca dos restantes cortes. Na **Figura 9** estão representados os resultados de nitrogênio obtidos nestes dois tipos de amostra. No primeiro corte, a concentração em N na matéria seca do azevém variou entre 1,79% em S, valor significativamente inferior aos restantes, e 3,2% no tratamento SUB. Para além do tratamento S, não se verificaram diferenças significativas entre tratamentos. Na matéria seca dos restantes cortes a concentração foi mais baixa do que no primeiro corte (variou entre 1,4% em S e SU e 1,51 % em SUB e SUBZ) sem diferenças significativas entre si. A maior concentração de N no primeiro corte deve estar relacionada com a maior disponibilidade do nutriente no solo. Conforme Steiner *et al.*, (2007), o biochar pode ter contribuído para o maior valor dos tratamentos (ainda que não significativo), visto que biochar utilizado no estudo em sua composição possui 0,50 % de N.



**Figura 9.** Concentração nitrogênio na matéria seca do primeiro corte (Corte 1) e na matéria seca dos restantes cortes (C2/3/4 e 5) do azevém e em cada tratamento. Letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

Em estudo de Carvalho *et al.*, (2019), com o objetivo de avaliar o efeito residual do nitrogênio a partir de um formulado com ureia e biochar, usando aveia preta,

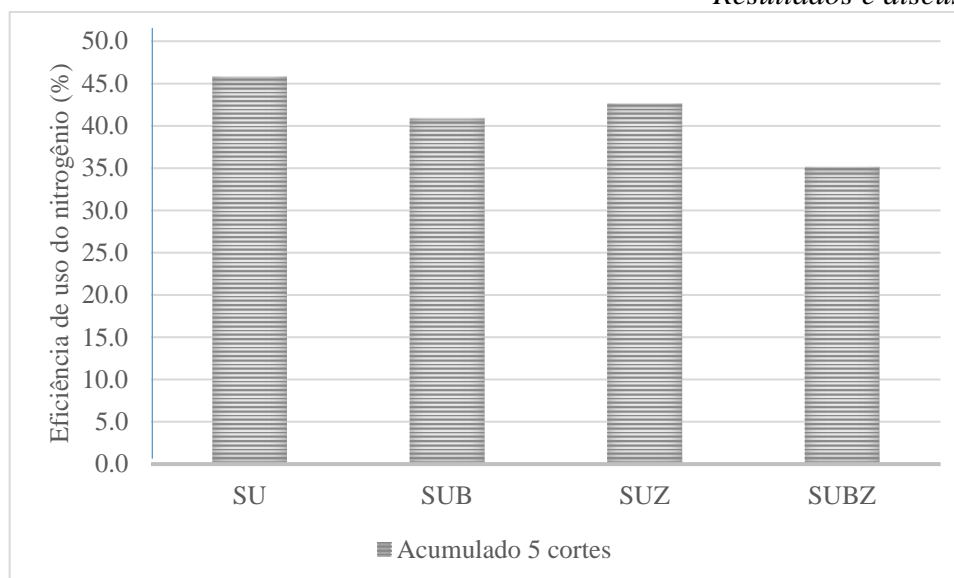
demonstraram que o formulado contribui para a melhor eficiência do nitrogênio quando aplicado a cultura.

A fim de testar o efeito e estabilidade do biochar no azevém, Toole *et al.*, (2012), em seus trabalhos obtiveram como resultados que a presença de biochar, teve efeitos significativos positivos na concentração de N, Ca e Mg, nas folhas dos dois primeiros cortes. O biochar funciona como habitat para microrganismos, inclusive para bactérias fixadoras de N<sub>2</sub>. Com este mecanismo a adição de biochar contribui para maior fixação de N<sub>2</sub> do ar para o solo, tornando-o mais disponível para a vegetação. O biochar atuando como habitat para diversos microrganismos fixadores de N<sub>2</sub>, demonstrou que a sua contribuição para maior fixação de N<sub>2</sub>, melhorou a produtividade de leguminosas, como o feijão (Thies e Rilling, 2009).

Apesar dos vários estudos já conduzidos com aplicação de biochar e zeólitos, sente-se ainda necessidade de mais estudos sobre os efeitos do biochar na agricultura, nomeadamente no que respeita às quantidades que devem ou podem ser aplicadas ou sobre o seu efeito combinado com outros fertilizantes. Chan e Xu (2009) consideram que, a longo prazo, as taxas lentas de libertação do nitrogênio a partir do biochar têm benefícios para o crescimento das plantas. De acordo com Blackwel *et al.*, (2009), a adição de biochar em associação com outros fertilizantes às culturas contribui para uma maior disponibilidade de nutrientes ao longo do tempo e menor perda destes por lixiviação.

A semelhança do que foi feito para a cultura da alface, procurou-se também avaliar a eficiência de uso do nitrogênio pela cultura do azevém, aplicando a equação de Sangeetha e Baskar, (2016) (**Equação 8**).

Na **Figura 10**, estão os resultados da aplicação da equação, para se conhecer a quantidade de nitrogênio recuperado pela cultura.



**Figura 10.** Nitrogênio aparentemente recuperado em relação ao tratamento S para os cinco cortes de azevém.

Tal como aconteceu no ensaio de alface, foi o tratamento SU que teve associada a maior recuperação de nitrogênio (45,8%), valor também semelhante ao verificado no mesmo tratamento na alface. O segundo valor mais elevado verificou-se em SUZ (42,6%). A presença de biochar parecer ter contribuído para menor disponibilidade de N, com o valor de recuperação mais baixo associado à sua combinação com zeólitos (SUBZ) (recuperação de 35,1% do N aplicado). Em trabalho de Arrobas e Rodrigues (2009) com o objetivo de estudar o efeito de fertilizantes minerais e orgânicos na produção do azevém, concluíram que fertilizantes minerais contribuíram para valores de NAR mais altos. Esse mesmo dinamismo ocorreu neste estudo, no qual SU teve o maior valor de NAR, tendo ocorrido imobilização do nitrogênio na presença dos condicionadores mineral (zeólitos) e orgânico (biochar).

#### 5.2.2.2 Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio

No que respeita à concentração dos macronutrientes (P, K, Ca e Mg) pode ver-se na **Tabela 13** a sua variação entre tratamentos e cortes.

**Tabela 13.** Concentração média de fósforo(P), potássio (K), cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) nos tecidos do azevém.

<b>Macronutrientes (%)</b>				
<b>Corte 1</b>				
<b>Tratamento</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
<b>S</b>	0,33 a	2,74 b	0,3 a	0,27 a
<b>SU</b>	0,31 a	2,8 ab	0,29 a	0,27 a
<b>SUB</b>	0,36 a	3,28 ab	0,29 a	0,27 a
<b>SUZ</b>	0,29 a	3,36 ab	0,28 a	0,26 a
<b>SUBZ</b>	0,28 a	2,86 ab	0,27 a	0,25 a
<b>Restante dos cortes</b>				
<b>Tratamento</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mg</b>
<b>S</b>	0,49 a	2,42 a	0,69 a	0,74 a
<b>SU</b>	0,34 b	2,25 a	0,42 b	0,44 b
<b>SUB</b>	0,37 b	2,22 a	0,41 b	0,44 b
<b>SUZ</b>	0,42 ab	2,33 a	0,43 b	0,44 b
<b>SUBZ</b>	0,44 ab	2,39 a	0,45 b	0,47 b

Na coluna e para cada conjunto de cortes, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de comparação múltipla de médias de Tukey HSD ( $\alpha=0,05$ ).

À semelhança do que se verificou no experimento com alface, o nutriente mais representado na matéria seca foi o potássio. No primeiro corte, o maior valor entre os tratamentos foi obtido em SUZ com 3,36 %, valor com diferença significativa para o valor obtido em S (2,74 %). A adição de condicionadores demonstrou impacto positivo no valor de potássio, tanto com uso de biochar e zeólito (SUZ e SUB). A combinação dos condicionadores (SUBZ) mostrou um valor mais baixo de K na biomassa (2,86%) ainda que sem diferenças significativas para os restantes tratamentos que não o tratamento S.

Para o fósforo, o maior valor foi obtido em SUB (0,36%) e o menor em SUBZ (0,28% da matéria seca). Não se registaram diferenças significativas entre os valores deste nutriente nos diferentes tratamentos. Para o cálcio, os valores variaram de 0,27 % (SUBZ) a 0,3% (S), também sem diferenças significativas entre tratamentos. A mesma tendência sem diferenças verificou-se para o magnésio. O maior valor verificou-se em S, SU e SUB (0,27%) e o menor em SUBZ (0,25%). Em suma, no primeiro ciclo a adição dos condicionadores, não resultou em influências significativas para a disponibilidade dos nutrientes, com exceção do potássio.

No conjunto dos restantes cortes (**Tabela 13**) é possível observar que o macronutriente predominante continua a ser o potássio, com valores a variarem entre 2,22% e 2,42% da matéria seca, sem diferenças significativas entre si. Os valores de

fósforo, cálcio e magnésio foram genericamente mais elevados no tratamento S, possivelmente associados a um efeito de concentração numa menor quantidade de biomassa produzida. Os valores mantiveram-se na gama de concentrações adequadas (**Tabela 14**), de acordo com Bryson *et al.*, (2014). A exceção vai para o magnésio que, nos restantes cortes aumentou a concentração relativamente ao primeiro corte, possivelmente devido às concentrações naturalmente elevadas do nutriente neste tipo de solo que ficou mais disponível na solução do solo ao longo do tempo.

**Tabela 14.** Concentrações ideais de macronutrientes para as culturas de acordo com Bryson *et al.*, (2014).

Macronutrientes (%)				
N	P	K	Ca	Mg
3,34 – 5,10	0,35 – 0,55	2,00 – 3,42	0,25 – 0,51	0,16 – 0,32

#### 5.4.3 Concentração de micronutrientes nos tecidos vegetais

As concentrações médias dos micronutrientes na matéria seca do azevém, apresentam-se na **Tabela 15**, divididas entre resultados do primeiro corte e do conjunto dos restantes cortes.

**Tabela 15.** Concentração média de Cobre (Cu), Ferro (Fe), Zinco (Zn) e Manganês (Mn) nos tecidos da cultura de alface do primeiro e segundo ciclo.

Micronutrientes (mg kg <sup>-1</sup> ) 1º Corte					
Tratamentos	B	Fe	Mn	Zn	Cu
S	9,80 a	710,00 a	36,14 b	22,49 a	10,43 a
SU	6,72 b	590,00 a	47,95 ab	37,56 a	14,97 a
SUB	6,71 b	586,00 a	46,79 ab	28,10 a	13,36 a
SUZ	6,42 b	644,00 a	46,82 ab	26,84 a	13,95 a
SUBZ	7,53 b	468,00 a	52,65 a	21,48 a	14,80 a
Micronutrientes (mg kg <sup>-1</sup> ); restantes cortes					
Tratamentos	B	Fe	Mn	Zn	Cu
S	9,81 a	290,00 a	181,43 a	40,55 a	8,76 a
SU	8,49 ab	391,00 a	158,79 ab	32,05 b	8,22 a
SUB	7,72 ab	474,00 a	120,35 b	29,65 b	8,35 a
SUZ	6,56 b	716,00 a	122,78 ab	31,55 b	9,44 a
SUBZ	6,84 b	256,00 a	111,2 b	30,29 b	8,58 a

Na coluna, e para cada ciclo, letras iguais indicam a ausência de diferenças significativas entre os tratamentos pelo teste de tukey hsd ( $\alpha=0,05$ ).

### *Resultados e discussões*

Genericamente, para o boro verificou-se a maior concentração deste micronutriente no tratamento S em ambas as análises. Não se verificaram diferenças significativas entre tratamentos para os nutrientes ferro, zinco e cobre. Verificou-se um aumento substancial da quantidade de manganês nos tecidos do primeiro corte para os restantes, talvez relacionado com os fenômenos de mineralização de compostos orgânicos do solo ao longo do tempo. Estes fenômenos terão alterado alguma dinâmica deste elemento, bem como do zinco e cobre.

Com base na **Tabela 16**, todos os micronutrientes e tratamentos aos valores estão em concentrações adequadas, com exceção nos últimos quatro cortes, em que os valores de Mn estão acima das concentrações consideradas adequadas.

**Tabela 16.** Concentrações adequadas de micronutrientes para as culturas (Bryson *et al.*, 2014).

Micronutrientes mg kg <sup>-1</sup>				
B	Fe	Mn	Zn	Cu
5 - 17	97 - 934	30-73	14-64	6-38

## **6 CONCLUSÃO**

A presença dos condicionadores não afetou de forma significativa os teores de cálcio e magnésio do solo por serem elementos abundantes no solo usado neste trabalho. Da mesma forma também não influenciaram o valor de pH por se tratar de um solo de reação neutra.

A presença de condicionadores teve um impacto positivo no teor de matéria orgânica do solo.

A aplicação de zeólitos aumentou significativamente a disponibilidade de potássio para as plantas.

De um modo geral a presença de condicionadores reduziu a quantidade de micronutrientes no solo, mas a dinâmica de imobilização parece depender do tipo de íon, o biochar parece ter imobilizado mais manganês e o zeólitos parecem ter imobilizado mais cobre.

A produção de alface e azevém respondeu significativamente à aplicação de nitrogênio na forma de ureia.

A adição de condicionadores originou produções mais baixas na alface, mas sem diferenças significativas entre tratamentos. No caso do azevém, planta que esteve mais tempo no solo, as diferenças foram mais marcadas. A produção total no tratamento com ureia foi a mais elevada, mas não diferiu do tratamento com zeólitos. A presença de biochar comprometeu a produção relativamente ao tratamento com ureia.

Os zeólitos parecem disponibilizar nutrientes a uma taxa superior à da libertação a partir do biochar.

Os condicionadores parecem limitar a quantidade de nutrientes no solo, reduzindo a sua eventual perda por lixiviação.

## REFERÊNCIAS

- Aguiar, T., Gonçalves, C.; Paterniani, M., Tucci, M.;Castro, C. (2014). Boletim 200: instruções agrícolas para as principais culturas econômicas.
- Almeida, L.A.V., Balbino, L.R. 1960. Determinação do fósforo e potássio assimiláveis em alguns solos do país. Anais do Instituto Superior de Agronomia. 23. Lisboa.
- Akbari, H.; Modarres-Sanavy, S. A. M.; Heidarzadeh, A. (2020). Fertilizer systems deployment and zeolite application on nutrients status and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 1–17.
- Andrade, J. C. R. de A.;Silva, L. R. D. da; Soares, I; Romero, R. E. (2011). Nitrato de amônio ocluído em zeólita 4A: Lixiviação e absorção de nitrogênio no cultivo de milho. *Química Nova*, 34(9), 1562–1568.
- Afonso, N.; Arrobas, M. (2009). Contribuição para a Elaboração da Carta de Solos da Cidade de Bragança. Livro de Actas, Qualidade do Ambiente Urbano: Novos Desafios, Instituto Politécnico de Bragança: 136 – 142
- Agegnehu, G.; Srivastava, A.K; Bird, M. I. (2017). The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, n 119, 156–170.
- Arrobas, M., Tomás, P.;Rodrigues, M. A. (2009). Efeito de fertilizantes minerais e orgânicos na produção de Azevém (*Lolium multiflorum* L.): produção de matéria seca e nitrogênio aparentemente recuperado *Revista de Ciências Agrárias (Portugal)*, 32(1), 112-120.
- Bernardi, A. D. C.; Monte, M. D. M.; Paiva, P. R. P.; Werneck, C. G., Haim, P. G.; Polidoro, J. C. (2008). Potencial do uso de zeólitas na agropecuária. Embrapa pecuária sudeste-documentos (infoteca-e).
- Bernardi, a. D. C.; Verruma M. R.; Werneck, c. G., haim, p. G.; Monte, m. B. (2005). Produção, aparência e teores de nitrogênio, fósforo e potássio em alface cultivada em substrato com zeólita. Embrapa pecuária sudeste-artigo em periódico indexado.
- Blackwell P.; Riethmuller G.; Collins M. Biochar applications to soil. In Lehmann, J.; Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Earthscan. 207p.

- Bryson, G.; Mill, H.; Sasseville, D.; Jones Jr, B.; Baker, S. (2014). Plant Analysis Handbook III. Micro-Macro Publishing, Inc
- Bremner, J.M. (1996). Nitrogen Total. In: Methods of Soil Analysis. Part 3 - Chemical Methods. SSSA Book Series. 5: 1085- 1121
- Butorac, A., Basic, F.; Mesic, M.; Kistic, I.; Filipan, T. (2002). Crop response to the application of special natural amendments based on zeolite tuff. Rostlinna Vyroba-UZPI (Czech Republic).
- Carvalho, C.; Ribeiro, N.; Alves, C. L.; Gomes, H.; Sarmiento, A. (2011), Metemoglobinemia: Revisão a Propósito de um Caso. 7.
- Carvalho, N. L.; Zobot, V. (2012). Nitrogênio: nutriente ou poluente? Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, 6(6), 960–974.
- Cejka, J.; Van B., H (Eds.). (2005). Zeolites and ordered mesoporous materials: progress and prospects: the 1st FEZA School on Zeolites, Prague, Czech Republic, August 20-21, 2005 (Vol. 157). Gulf Professional Publishing.
- Chaib, J. G. (2019). Produção de biochar por pirólise de resíduos verdes de um horto e avaliação do seu potencial no crescimento de lactuca sativa (Doctoral dissertation).
- Chan, K.Y., Xu, Z. Biochar: Nutrient Properties and Their Enhancement. In Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Earthscan. 449p.
- Código de boas práticas agrícolas (2018). Ministério da Agricultura, Florestas e Desenvolvimento Rural. Despacho nº 1230/2018. Diário da Republica, 2º - N 25 – 5 de fevereiro de 2018.
- Costa, A. R. da. (2015). Perdas gasosas de nitrogênio e atributos microbiológicos do solo em pastagens após aplicação de urina e fezes de bovinos [Master, Universidade de Brasília].
- Covalski, C. D. A. (2018). Influência da aplicação de Biochar e Zeólitos na dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta (Master dissertation).
- Carvalho, T. A.; Puga, A.; Pires, A.; Ligo, m.; de Andrade, C. A. (2019). Efeito residual de fertilizantes nitrogenados formulados com biocarvão. In embrapa meio ambiente-artigo em anais de congresso

- Resende, a. V.; Martins, D.; Ferreira, J. (2016). Ureia combinada com zeólita visando maior eficiência na adubação nitrogenada. In embrapa milho e sorgo-artigo em anais de congresso
- DeLuca, H. T; Mackenzie M.D; Gundale M.J. Biochar: effects on soil nutriente transfromations In Lehmann, J.; Joseph, S. (2009). Biochar for environmental management: science, technology and implementation. Earthscan. 449p.
- Doula, M.K.; Kavvadias, V.A.; Elaiopoulos, K. (2012). Zeolites in soil remediation processes. In: Inglezakis, V.J. and Zorpas, A.A. eds. Handbook of Natural Zeolites. Bentham Science Publishers. pp 519-568.
- Ebeling, A. G.; Anjos, L. H. C. dos; Perez, D. V.; Pereira, M. G., & Valladares, G. S. (2008). Relação entre acidez e outros atributos químicos em solos com teores elevados de matéria orgânica. *Bragantia*, 67(2), 429–439.
- Ferreira, V. P. (2002). Doses e parcelamento de nitrogênio em alface(Manager dissertation).
- Fontaneli, R. S.; dos Santos, H. P; Fontaneli, R.S. (2012). Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira. Embrapa Trigo-Livro científico.
- Garcia, G.; Cardoso, A. A.; Santos, O. A. M. dos. (2013). Da escassez ao estresse do planeta: Um século de mudanças no ciclo do nitrogênio. *Química Nova*, 36(9), 1468–1476.
- Guarçoni, A. (2008). Dinâmica dos fertilizantes nitrogenados a base de nitrato. *Revista Campo e negócios*.
- Guo, M.; Song, W.; Tian, J. (2020). Biochar-Facilitated Soil Remediation: Mechanisms and Efficacy Variations. *Frontiers in Environmental Science*. 8: 521512.
- Havlin, J. L.; Tisdale, S. L.; Nelson, W. L.; Beaton, J. D. (2014). Soil fertility and fertilizers. Pearson Prentice Hall
- Hunt, P. G.; Cantrell, K. B.; Bauer, P. J.; Miller, J. O. (2013). Phosphorus fertilization of ryegrass with ten precisely prepared manure biochars. *Transactions of the ASABE*, 56(6), 1317.
- IPMA. (2019-2020). Boletim Climatológico Mensal: Portugal continental. Lisboa: Instituto português do mar e da atmosfera
- Júnior, R. G., Pereira, L. G. R.; Tomich, T. R., Machado, F. S.; Gonçalves, L. C. (2016). O que é ureia (características químicas). 17.

- Keren, R. 1996. Boron. In *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods- SSSA. Book series n° 5.*
- Lee, J.A; Mcneill S.; Rorison, I.h. *Nitrogen as an Ecological Factor.* Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1983
- Lehmann, J.; Joseph, S. (Orgs.). (2009). *Biochar for environmental management: Science and technology.* Earthscan
- Lija, M.; Haruna, A. O.; Kasim, S. (2014). Maize (zea mays l.) Nutrient use efficiency as affected by formulated fertilizer with clinoptilolite zeolite. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 284-292.
- Lima, S. L.; Marimon J, B. H.; Melo S, K. da S.; Reis, S. M., Petter; F. A., Vilar, C. C.; Marimon, B. S. (2016). Biochar no manejo de nitrogênio e fósforo para a produção de mudas de angico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(2), 120–131.
- Liu, Z.; Cheng, X.; Sun, D.; Meng, J.; Chen, W. (2017). Maize stover biochar increases urea (<sup>15</sup>N isotope) retention in soils but does not promote its acquisition by plants during a 4-year pot experiment. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 77(4), 382–389.
- LQARS. (2006). *Manual de fertilização das culturas.*
- Luz, A.B. *Zeolitas: Propriedades e usos industriais.* (1995). Série: Tecnologia Mineral, v. 68, 37 p.
- Tavares, R. M (1988). *A cultura da alface.* Ministério da agricultura, pescas e alimentação. Lisboa.
- Marschner, P. 2012. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants.* Third Edition. Academic Press. Elsevier.
- Martinelli, L. A. (2007). Os caminhos do nitrogênio do fertilizante ao poluente. *Informações agronômicas*, 118(6).
- Milhomens, K. K. B.; Nascimento, I. R. do; Tavares, R. D. C., Ferreira, T. A.; Souza, M. E. (2015). Avaliação de características agronômicas de cultivares de alface sob diferentes doses de nitrogênio. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, 10, 143.
- Ming, D. W.; Allen, E. R. 2001. Use of Natural Zeolites in Agronomy, Horticulture, and Environmental Soil Remediation in: d. L. Bish, d. W. Ming, editors *Natural*

- Zeolites: occurrence, properties, applications. *Reviews in mineralogy & geochemistry*. Volume 45. P 619-650.
- Milosevic, T.; Milosevic, N. (2009). The effect of zeolite, organic and inorganic fertilizers on soil chemical properties, growth and biomass yield of apple trees. *Plant Soil Environ*, v 12, n 51, 528-535.
- Moreira, I. N. (2018) Caracterização da acumulação de elementos potencialmente tóxicos em alface (*Lactuca sativa* L.). 723.
- Nelson, D. W. ; L. E. Sommers. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical Methods- SSSA*. Book series nº 5.
- Nóbrega, Í. P. C. (2011). Efeitos do biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: sequestro de carbono no solo (Doctoral dissertation, ISA/UTL).
- Ogawa, M. (1994) Symbiosis of people and nature in the tropics, *Farming Japan*, vol 28, pp10–34
- Toole, A.; Knoth de Z, K.; Steffens, M.; Rasse, D. P. (2013). Characterization, Stability, and Plant Effects of Kiln-Produced Wheat Straw Biochar. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 429–436.
- Oliveira, L. V.; Ferreira, O. G. L.; Coelho, R. A. T.; Farias, P. P.; Silveira, R. F. (2014). Características produtivas e morfofisiológicas de cultivares de azevém. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44(2), 191–197.
- Paiva, P.; Monte, M.; Duarte, A.; Salim, H.; Barros, F. (2004). Aplicação de zeólita natural como fertilizante de liberação lenta.
- Paula, A. C. S. D. (2020). Diagnóstico estratégico da indústria de fertilizantes nitrogenados no Brasil.
- Pellegrini, L. G. de; Monteiro, A. L. G.; Neumann, M., Moraes, A.; de Pellegrin, A. C. R. S. de; Lustosa, S. B. C. (2010). Produção e qualidade de azevém-anual submetido a adubação nitrogenada sob pastejo por cordeiros. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 39(9), 1894–1904.
- Pereira, D. C. (2016). Efeito de adubações orgânica e mineral associadas ao biochar sobre parâmetros do solo e produtividade da alface.
- Petter, F. A.; Marimon, J.; Andrade, F. R.; Schossler, T. R., Gonçalves, L. G.; Marimon, B. S. (2012). Biochar conditioner as substrate for the production of lettuce. *Revista Agrarian*, 5(17), 243-250.

- Polat, E.; Karaca, M.; Demir, H.; Onus, A. N. (2004). Use of natural zeolite (clinoptilolite) in agriculture. *Journal of fruit and ornamental plant research*, 12(1), 183-189.
- Queiroz, J. G. O. (2019). *Revista Trabalho Necessário*, 17(34), 299 (Manager dissertation).
- Rawat, J.; Saxena, J.; Sanwal, P. (2019). Biochar: A Sustainable Approach for Improving Plant Growth and Soil Properties. In V. Abrol & P. Sharma (Orgs.), *Biochar—An Imperative Amendment for Soil and the Environment*. IntechOpen.
- Ribeiro, D. (2013). Processo de Haber-Bosch. *Revista de Ciência Elementar*, 1
- Roman, E. S.; Vargas, L.; Rizzardi, M. A.; Mattei, R. W. (2004). Resistência de azevém (*Lolium multiflorum*) ao herbicida glyphosate. *Planta Daninha*, 22, 301–306.
- Rondon, M.; Lehmann, J.; Ramírez, J.; Hurtado, M. (2007) ‘Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions’, *Biology and Fertility of Soils*, vol 43, pp699–708
- Ronquim, C. C. (2010). Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. Embrapa Territorial-Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento (infoteca-e).
- Rowell, D.L. (1994). *Soil Science. Methods & Applications*. Harlow: Longman Group UK.
- Sangeetha, C.; Baskar, P. (2016). Zeolite and its potential uses in agriculture: A critical review. *Agricultural Reviews*
- Sangoi, L.; Ernani, P. R.; Lech, V. A.; Rampazzo, C. (2003). Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da uréia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. *Ciência Rural*, 33(1), 65–70.
- Santoro, A. L.; Enrich P, A. (2011). Regulação microbiológica da disponibilidade de nitrogênio em ecossistemas aquáticos continentais. *Oecologia australis*, 15(2), 213–235.
- Santos, J.Q. 2015. Fertilização. Fundamentos agroambientais da utilização de adubos e corretivos. Pubblindústria
- Santos, R. F.; Borsoi, A.; Tomazzoni, J. L.; Viana, O. H. (2011). Aplicação de nitrogênio na cultura da alface (*Lactuca sativa* L.). *Varia Scientia Agrárias*, 2(2), 69-77.
- Silva, D. L. (2018). Efeito da aplicação de condicionadores do solo na biodisponibilidade de metais pesados (Doctoral dissertation).

- Soares, F. S. C. (2010). Caracterização e aplicação de zeólitas naturais (Doctoral dissertation).
- Spadotto, C. A.; Gomes, M. A. F. Perdas de nutrientes. Brasília, DF: EMBRAPA, 2019.
- Steiner, C. (2007). Soil charcoal amendments maintain soil fertility and establish carbon sink-research and prospects. *Soil Ecology Res Dev*, 1-6.
- Temminghoff, E.E.J.M.; Houba, V. J.G. 2004. *Plant Analysis Procedures*. Second Edition. Temminghoff, E.J.M., Houba, V.J. G Eds .Kluwer Academic Publishers.
- Thies J. E; Rilling M.C. Characteristics of Biochar: Biological Properties In Lehmann, J.; Joseph, S. (2009). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Earthscan. 85p.
- Van Reeuwijk. 2002. *Procedures for soil analysis*. Sixth edition. ISRIC. FAO.
- Van Reeuwijk. 2002. *Procedures for soil analysis*. Technical Paper 9. ISRIC. FAO.
- Varenes, A. 2003. *Produtividade dos Solos e Ambiente*. Escolar Editora. Lisboa.
- Verheijen, F.; Jeffery, S.; Bastos, A. C.; Van der Velde, M. ; Diafas, I. (2010). Biochar application to soils. A critical scientific review of effects on soil properties, processes, and functions. 162 p.
- Vieira, R. F. (2017). *Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas*. Embrapa Meio Ambiente-163 p. ISBN 978-85-7035-780-9
- Villar, M. L. P. (2007). *Manual de interpretação de análise de plantas e solos e recomendação de adubação*. EMPAER-MT.
- Weil, R.R; Brady, N.C. 2017. *The Nature and Properties of Soils*. Fifteenth Edition. Global Edition. Pearson.
- Zoppas, F. M.; Bernardes, A. M., & Meneguzzi, Á. (2016). Parâmetros operacionais na remoção biológica de nitrogênio de águas por nitrificação e desnitrificação simultânea. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 21(1), 29–42.
- Zerulla, W., Barth, T.; Dressel, J.; Erhardt, K.; Von L, K. H.; Pasda, G. ; Wissemeier, A. (2001). 3, 4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP)—a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biology and fertility of soils*, 34(2), 79-84.