

# **Efeito de fertilizantes de liberação gradual de nutrientes na dinâmica do nitrogênio no solo e na produção da cultura do milho (*Zea mays*)**

**José Carlos Chiochetta Junior**

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

Orientado por

**Manuel Ângelo Rosa Rodrigues - IPB**

Coorientado por

**Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues - IPB**

**Wilson Itamar Godoy - UTFPR**

**Bragança**

**2019**

JOSÉ CARLOS CHIOCHETTA JUNIOR

**EFEITO DE FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL DE NUTRIENTES NA  
DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO SOLO E NA PRODUÇÃO DA CULTURA DO  
MILHO (*ZEA MAYS*).**

Dissertação apresentada ao Instituto Politécnico de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadores:

Prof. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues

Prof<sup>a</sup>. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues

Prof. Wilson Itamar Godoy

BRAGANÇA  
2019

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero agradecer a Deus por ter me dado a oportunidade desse mestrado e por iluminar meu caminho para alcançar mais essa vitória em minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Manuel Ângelo Rodrigues e coorientadores Prof. Dra. Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues e Prof. Dr. Wilson Itamar Godoy, pelos conselhos, orientação, incentivo, disponibilidade e o conhecimento transmitido durante a realização dessa dissertação.

Ao Instituto Politécnico de Bragança e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná pela oportunidade de participar do programa de dupla diplomação e poder realizar esta dissertação.

Ao Laboratório de Solos do IPB, pelo suporte durante as análises. As auxiliares do laboratório, Rita, Ana e Soraya pelo auxílio, apoio e aos ensinamentos durante as análises.

A todos os meus familiares, em especial aos meus pais, José e Odete, que sempre me apoiaram em todas as etapas de minha vida, por todo o amor e por não medirem esforços para que eu seguisse meus sonhos e alcançasse os meus objetivos. A minha filha, Valentina, pois me deu força em todos os momentos para sempre continuar em frente. Ao meu irmão Evandro por todo o esforço e dedicação para eu poder chegar a essa etapa em minha vida.

Aos meus amigos e colegas que me ajudaram na realização desta dissertação e a todas as amigas que fiz nesse tempo em Bragança. Quero agradecer principalmente ao meu amigo João Victor, meu amigo do peito, por sempre me apoiar, me acompanhar e me ajudar em todas as minhas decisões, sempre estando ao meu lado nos momentos difíceis. A minha amiga Maiz, pelos conselhos e por nunca me deixar desanimar.

Por fim, agradeço a todos que de uma forma ou outra contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

Meu muito obrigado!

## RESUMO

O nitrogênio é o nutriente mais determinante na produtividade das culturas e aquele que é utilizado em maior quantidade na cultura do milho. Contudo, fenômenos como volatilização de amônia e lixiviação e desnitrificação de nitratos podem causar perdas de 30 a 50% do nitrogênio utilizado como fertilizante, o que impulsiona pesquisas por novos fertilizantes que liberem os nutrientes de forma gradual, tentando assegurar um fornecimento mais regular dos nutrientes às plantas durante o seu ciclo vegetativo e reduzir o número de aplicações. O objetivo deste estudo é avaliar o efeito de fertilizantes que liberam os nutrientes de forma gradual para as plantas no crescimento e produtividade da cultura do milho e na dinâmica do nitrogênio e em algumas propriedades do solo. Foram conduzidos ensaios na área experimental do Instituto Politécnico de Bragança, com delineamento experimental completamente causalizado. Os tratamentos fertilizantes utilizados foram: um fertilizante mineral (nitrato de amônio, 27 %N) em três doses (50, 100 e 200 kg N ha<sup>-1</sup>); um fertilizante composto NPK de liberação controlada e um fertilizante estabilizado com um inibidor da nitrificação, ambos nas doses de 100 e 200 kg N ha<sup>-1</sup>; um corretivo orgânico (estrupe de vaca) em uma dose correspondente à aplicação de 100 kg N ha<sup>-1</sup>; e uma modalidade testemunha sem fertilização. De cada tratamento foram incluídas três repetições. Foi avaliado o estado nutricional das plantas através de análise foliar e o teor de nitrogênio mineral no solo em pré-cobertura (PSNT, *Pre-sidedress Soil Nitrate Test*). Na colheita foi avaliada a produtividade de forragem, o teor de nitratos nos caules (*Stalk Nitrate Test*) e a exportação de nutrientes. Após a colheita foi avaliado o nitrogênio mineral residual e o nitrogênio potencialmente mineralizável e demais propriedades do solo. O pH do solo se mostrou baixo em todos os tratamentos e houve uma diminuição no valor com a elevada aplicação de nitrogênio e para os adubos de liberação gradual. A relação dos valores do teste aos nitratos no solo em pré-cobertura e do nitrogênio mineral residual no fim da estação de crescimento mostrou que o corretivo orgânico e os tratamentos com doses elevadas de nitrogênio apresentam maiores riscos de perdas de nitrogênio com a chegada das chuvas de outono. Este resultado foi corroborado com o teor de nitratos nos caules. Na produtividade registaram-se aumentos significativos nas modalidades fertilizadas em comparação com a modalidade testemunha. Os fertilizantes com mecanismos de liberação gradual não mostraram benefícios significativos em comparação com o fertilizante mineral convencional.

**Palavras chave:** *Zea Mays*; fertilizantes de liberação lenta; fertilizantes de liberação controlada; fertilizantes estabilizados; corretivos orgânicos; *presidedress soil nitrate test*.

## ABSTRACT

Nitrogen is the most determinant nutrient in crop productivity and the one that is used in greater amounts in maize crop. However, phenomena such as ammonia volatilization, nitrate leaching and denitrification can cause losses of 30 to 50% of the nitrogen applied as a fertilizer, which drives researches for new fertilizers that release nutrients gradually, trying to ensure a more regular supply of nutrients to the plants during the growing season and the reduction of the number of fertilizer applications. The objective of this study was to evaluate the effect of fertilizers that release nutrients gradually to the plants on the growth and yield of maize and on soil nitrogen dynamic and several other soil properties. A field trial was conducted in an experimental plot of the Polytechnic Institute of Bragança, arranged in a completely randomized design. The fertilizer treatments used were: mineral fertilizer (ammonium nitrate, 27% N) in three rates (50, 100 and 200 kg N ha<sup>-1</sup>); a controlled-release NPK fertilizer and a stabilized fertilizer with a nitrification inhibitor, both in the rates of 100 and 200 kg N ha<sup>-1</sup>; an organic amendment (cow manure) at a rate corresponding to the application of 100 kg N ha<sup>-1</sup>; and a control treatment without nitrogen application. Three replicates were included of each treatment. The nutritional status of the plants was evaluated through leaf analysis and soil mineral nitrogen content using the *presidedress soil nitrate test* (PSNT). At the harvest, forage yield, stalk nitrate concentration (*Stalk Nitrate Test*) and nutrients removal in the aboveground biomass were assessed. After the harvest, the residual mineral nitrogen, potentially mineralizable nitrogen and other soil properties were also determined. Soil pH decreased as the rate of nitrogen applied increased, the same result was observed with gradual-release mechanism fertilizers. The results of PSNT and residual mineral nitrogen at the end of the growing season suggest that the use of organic amendments and high nitrogen rates present a higher risk of nitrogen losses following the autumn rains. This result was corroborated by the stalk nitrate test. Dry matter yield significantly increased in all fertilized treatment in comparison to control. Controlled-release and stabilized fertilizers did not show benefits compared to the conventional mineral fertilizer.

**Keywords:** *Zea Mays*; controlled-release fertilizers; stabilized fertilizers; nitrification inhibitor; organic amendments; presidedress soil nitrate test; stalk nitrate test

## ÍNDICE

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
<b>3.REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>14</b>
3.1 A CULTURA DO MILHO .....	14
3.1.1 Origem e importância.....	14
3.1.2 Importância econômica.....	14
3.2 AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE.....	16
3.2.1 Desnitrificação .....	16
3.2.2 Volatilização da amônia .....	17
3.2.3 Lixiviação .....	17
3.3 EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DOS NUTRIENTES .....	18
3.4 FERTILIZAÇÃO E NUTRIÇÃO NA CULTURA DO MILHO.....	19
3.5 IMPORTÂNCIA DO NITROGÊNIO PARA A CULTURA DO MILHO .....	20
3.6 FERTILIZAÇÃO MINERAL .....	22
3.7 FERTILIZAÇÃO ORGÂNICA .....	23
3.8 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL DE NUTRIENTES.....	25
3.8.1 Fertilizantes de liberação lenta .....	25
3.8.2 Fertilizantes de liberação controlada .....	26
3.8.3 Fertilizantes estabilizados.....	27
3.9 ESTUDOS COM FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL .....	29
<b>4.MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>30</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	30
4.2 Delineamento experimental.....	31
4.3 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO.....	31
4.4 TRATAMENTOS FERTILIZANTES.....	33
4.5 DETERMINAÇÕES EM CAMPO .....	35
4.5.1 Concentração de clorofila pelo SPAD.....	35
4.5.2 Índice de vegetação pelo NDVI.....	36
4.5.3 Amostragem de folhas .....	37
4.5.4 Amostragem de solo .....	38
4.5.5 Produtividade.....	38
4.6 ANÁLISES LABORATORIAIS.....	38
4.6.1 Análises nos solos .....	38
4.6.2 Análise dos nutrientes nos tecidos.....	41
4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	42
<b>5.RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>44</b>

5.1 AVALIAÇÃO DO NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO ANTES DA ADUBAÇÃO DE COBERTURA.....	44
5.2 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA DURANTE A ESTAÇÃO DE CRESCIMENTO.....	46
5.2.1 Teor de clorofila - SPAD .....	46
5.2.2 Índice de vegetação - NDVI .....	48
5.2.3 Teor de nutriente nas folhas .....	49
5.3 PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO .....	52
5.3.1 Produtividade.....	52
5.3.2 Macronutrientes na planta na colheita .....	54
5.3.3 Micronutrientes na planta.....	57
5.3.4 Nitratos nos caules na colheita .....	58
5.3.5 Nitrogênio aparentemente recuperado .....	60
5.4 PROPRIEDADES DO SOLO .....	61
5.4.1 Nitrogênio facilmente mineralizável .....	61
5.4.2 pH no solo.....	62
5.4.3 Matéria orgânica .....	63
5.5 TEOR DE NUTRIENTES NO SOLO.....	64
5.5.1 Nitrogênio .....	64
5.5.2 Nitrogênio residual.....	66
5.5.3 Fósforo e potássio .....	67
5.5.4 Boro .....	69
5.5.5 Capacidade de troca catiônica.....	70
<b>6.CONCLUSÕES.....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Produção de milho dos quatro maiores produtores mundiais (EUA, China, Brasil e Argentina) entre os anos de 2007 a 2017 (Adaptado de FAOSTAT, 2018).	15
Figura 2 – Imagem do local de implantação do experimento (GOOGLE, 2018).	30
Figura 3 – Precipitação e temperatura média do ar mensais da cidade de Bragança entre janeiro e dezembro de 2018 (ESA - IPB, 2018).	31
Figura 4- Implantação do experimento.	32
Figura 5 – Aspecto visual dos fertilizantes. A – Nitro 27, B – Entec 26 e C – Exactyon 12-10-18.	35
Figura 6 - Clorofilômetro Minolta (modelo SPAD-502), utilizado nas avaliações de teores de clorofila no experimento.	36
Figura 7 – Utilização do aparelho de NDVI a campo.	37
Figura 8 – Amostras de folhas colhidas a campo.	37
Figura 9 – Teor de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ) no solo antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).	44
Figura 10 – Teor de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).	46
Figura 11 – Valores da leitura do SPAD antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).	47
Figura 12 – Valores do índice de vegetação NDVI antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).	48
Figure 13 – Concentração de nitrogênio (N) nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).	49
Figura 14 – Produtividade da cultura do milho em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 $\text{kg ha}^{-1}$ ).	

Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).....	53
Figura 15 – Concentração de nitrogênio (N) na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).....	55
Figura 16 – Concentração de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> nos caules na colheita (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).....	59
Figura 17 – Teor de nitrogênio aparentemente recuperado (NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). .....	60
Figura 18 – Teores de matéria orgânica (MO) no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....	64
Figura 19 – Teores de nitrogênio no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....	65
Figura 20 – Teor de nitrogênio residual no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....	66
Figura 21 – Teor de fósforo (P) no solo expresso em P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).....	68
Figura 22 – Teor de potássio (K) no solo expresso em K <sub>2</sub> O (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).....	69
Figura 23 – Teor de boro (B) no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .....	70

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tratamentos do experimento constituídos por fertilizantes orgânicos, mineral e liberação gradual. Bragança, 2018. ....	33
Tabela 2 - Composição do fertilizante orgânico utilizado no ensaio, com base nas análises laboratoriais efetuadas no início dos ensaios. ....	33
Tabela 3 - Concentração de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio) e Mg (magnésio) nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .	51
Tabela 4 - Concentração dos micronutrientes nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....	52
Tabela 5 - Concentração de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio) e Mg (magnésio) na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). .	56
Tabela 6 – Concentração dos micronutrientes na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....	57
Tabela 7 – Valores da extração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> com KCl a quente, para KCl a frio e NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> hidrolisável, calculado pela diferença dos anteriores (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....	62
Tabela 8- Valores de pH na profundidade de 0 a 20 cm, determinados após extração com H <sub>2</sub> O e KCl (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....	63
Tabela 9 – Capacidade de troca catiônica (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha <sup>-1</sup> ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). ....	70

## 1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays*) tem alto potencial produtivo, e é uma das principais espécies cultivadas no mundo, pois, além de fornecer produtos largamente utilizados pelo homem e pelos animais, é importante matéria-prima para a indústria, em razão da quantidade e da natureza das reservas acumuladas em seus grãos.

O milho para silagem é um alimento fundamental na alimentação animal, onde a produção de forragem em volume e de qualidade é um dos principais desafios na atividade, sendo que dentro do manejo da cultura a fertilização pode ser fundamental para atingir boas produtividades.

O nitrogênio é um dos nutrientes mais exigidos pela cultura do milho e o exportado em maior quantidade nos grãos, sendo limitante no solo e um dos mais requeridos pelas plantas cultivadas para elevar a produção. O milho é um exemplo de cultura onde o nitrogênio é empregado em grandes quantidades na forma de fertilizantes minerais e orgânicos.

A eficiência do uso do nitrogênio em aplicação nas culturas é altamente influenciada pelas condições de solo e clima, ocorrendo perdas quando não utilizado em condições adequadas.

As perdas de nitrogênio para os cursos de água e para a atmosfera são bastante significativas, com isso novas tecnologias de fertilizantes estão sendo implantadas no mercado para proteger os nutrientes e evitar perdas por volatilização, desnitrificação e lixiviação.

Uma técnica alternativa de fertilização consiste no emprego de fertilizantes de liberação gradual, reduzindo as perdas de nitrogênio e melhorando a disponibilização às plantas, uma vez que esses fertilizantes podem ser aplicados totalmente em fundo e são liberados gradativamente, podendo permanecer no solo durante todo o ciclo da cultura.

Sendo assim, os fertilizantes de liberação gradual podem aumentar a eficiência do uso de nitrogênio pelas plantas e minimizar impactos ambientais causados pela adubação nitrogenada convencional, reduzindo, por exemplo, a lixiviação dos nitratos para as camadas mais profundas do solo, evitando que estes atinjam o lençol freático e contaminem a água, e diminuindo a emissão de gases causadores do efeito estufa para a atmosfera, como óxidos de nitrogênio e amônia.

Os dois tipos de fertilizantes de liberação gradual mais conhecidos comercialmente são os fertilizantes de liberação controlada e os de liberação lenta. Para diferenciá-los deve ser utilizado o termo fertilizante de liberação controlada quando se conhece a duração da liberação do nutriente. Já para os fertilizantes de liberação lenta não são conhecidos esses parâmetros, os quais são influenciados pelo solo e por condições climáticas, liberando assim os nutrientes em ritmo mais lento em comparação aos convencionais. Também existem os inibidores de urease, que podem reduzir em até 60% a perda de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3^+$  pela aplicação superficial de ureia, aumentando a eficiência do uso de nitrogênio e a produtividade das culturas. Os inibidores de nitrificação têm por objetivo retardar a formação de  $\text{NO}_3^-$  no solo mediante interferência na atividade das bactérias do gênero *nitrosomonas*, responsáveis pela oxidação do  $\text{NH}_4^+$ .

O presente estudo visa avaliar os efeitos da aplicação de fertilizantes de liberação gradual de nutrientes no solo em comparativo com fertilizantes convencionais e corretivos orgânicos.

## 2. OBJETIVOS

### GERAL

O objetivo geral desse trabalho consiste em avaliar o efeito de fertilizantes que liberam os nutrientes de forma gradual para as plantas nas propriedades do solo, em particular na dinâmica do nitrogênio, e na produtividade da cultura do milho.

### ESPECÍFICOS

Avaliar o desempenho das plantas através da determinação da intensidade da cor verde, estado nutricional e produção de biomassa;

Estudar a dinâmica do nitrogênio no sistema solo/planta através da avaliação do nitrogênio presente no solo e teor de nitratos nos caules durante a estação de crescimento;

Estudar a dinâmica dos nutrientes na planta através da análise elementar dos tecidos vegetais;

Avaliar os fertilizantes de liberação gradual de acordo com sua eficiência em reduzir perdas de nitrogênio.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 A CULTURA DO MILHO

##### 3.1.1 Origem e importância

O milho é uma monocotiledônea pertencente à família Gramineae/Poaceae, gênero *Zea*, com origem no teosinto, subespécie mexicana *Zea mays* ssp. mexicana (Schrader) Iltis, descoberta há mais de 8000 anos e cultivada atualmente em muitas partes do mundo (FANCELLI e LIMA, 1982).

Esse cereal foi uma das primeiras plantas a ser domesticada pelo homem, sendo cultivado desde as civilizações pré-colombianas. Sua chegada à Europa aconteceu em 1493 (BURANELLO, 2009). No Brasil, o cultivo do milho já era realizado pelos índios, uma vez que eles o utilizavam como item principal de sua dieta. Porém, foi com a chegada dos portugueses que o consumo do cereal teve um crescimento significativo no país, passando a incorporar o hábito alimentar de toda população (APROSOJA, 2016).

Este cereal assume grande importância social e econômica, principalmente pela geração de empregos na zona urbana e rural, e por fornecer produtos largamente utilizados na alimentação humana, tanto na forma “in natura”, como processado, e para a alimentação animal, representando o principal insumo para confecção de rações, devido às suas elevadas qualidades nutricionais, contendo quase todos os aminoácidos conhecidos, com exceção da lisina e do triptofano. Além disso, o milho e seus derivados constituem-se em matéria-prima para vários segmentos da indústria, como por exemplo, farmacêutica, têxtil, bebidas, cosméticos, papéis, curtumes, colas e etanol (SILVA, 2005).

##### 3.1.2 Importância econômica

A produção do milho a nível mundial em 2017 atingiu 1.033.471.000 toneladas (CONAB, 2018). Em 2017/2018, os três maiores produtores mundiais foram Estados Unidos (359.502.000 t), China (215.000.000 t) e Brasil (95.000.000 t).

No Brasil a área de milho plantado em 2018 foi de 5,1 milhões de hectares (CONAB, 2018), quando comparado aos últimos anos apresenta um crescente aumento, que visa atender demanda crescente dos subprodutos do milho.

O grande uso de milho na indústria de alimentação humana e animal, fez com que as exportações mundiais alcançassem na última safra um volume de 142,9 milhões de toneladas (USDA, 2016). Em relação à exportação, em 2018 o Brasil embarcou um volume próximo de 20,8 milhões de toneladas, sendo superior ao ano passado.

Em Portugal cultiva-se de norte a sul do país. O milho é utilizado para produção de grão e forragem (sobretudo silagem). Apesar de o milho ser o cereal mais produzido em Portugal, Barros e Calado (2014) referem que a produção nacional portuguesa representa apenas 32% das necessidades do país em grão, o que faz com que a importação seja necessária.

Em 2017, a produção nacional portuguesa de milho atingiu 745.123 toneladas, sendo que houve um decréscimo na área semeada de milho durante os últimos anos, sendo que em 2014 contava com quase 100.000 hectares plantados e em 2017 com uma área de 86.520 hectares, esse fato é justificado pelos baixos preços do milho nos mercados mundiais, remetendo esta cultura para níveis muito próxima do limiar de rentabilidade e pela reduzida disponibilidade hídrica (FAOSTAT, 2018).

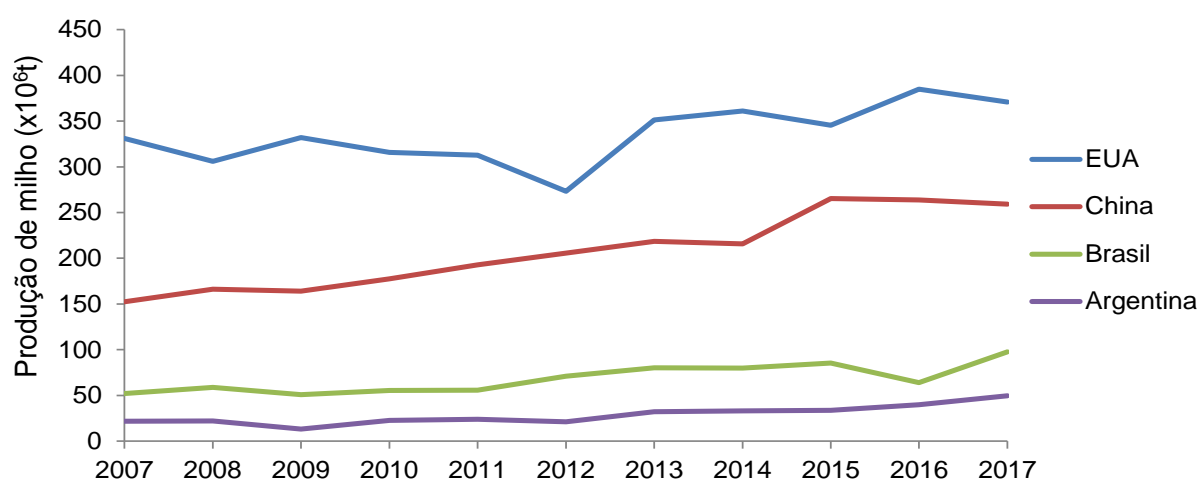


Figura 1 – Produção de milho dos quatro maiores produtores mundiais (EUA, China, Brasil e Argentina) entre os anos de 2007 a 2017 (Adaptado de FAOSTAT, 2018).

Além de sua importância econômica, a grande exigência de nitrogênio pelo milho torna essa cultura altamente influenciada pela adubação nitrogenada

(CANTARELLA, 1993), fato que justificou sua escolha como cultura teste para avaliar se o uso de fertilizantes de liberação gradual de proporcionar incrementos na absorção de nitrogênio e conseqüentemente na produção de grãos.

### 3.2 AGRICULTURA E MEIO AMBIENTE

O nível de fertilidade e as características físicas, químicas e biológicas do solo são fatores determinantes para que o solo forneça a quantidade necessária de nutrientes e água para as plantas (CALOURO, 2000).

Segundo Calouro (2000) fertilização racional de uma cultura é a aplicação ao solo ou diretamente à planta dos nutrientes que não se encontram disponíveis no solo, fazendo isso na forma e época mais apropriadas para que os nutrientes sejam absorvidos com eficácia, sendo que devem ser aplicados em quantidade suficiente para obter uma boa colheita.

A quantidade de fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo, juntamente com a técnica utilizada e a época de aplicação, são fatores que estão relacionados à prevenção da poluição das águas superficiais e subterrâneas com nitratos, pois o nitrogênio orgânico e amoniacal passa à forma nítrica, a qual sendo muito solúvel é arrastada rapidamente pelas águas que se infiltram e/ou se escoam a superfície do solo, indo poluir os aquíferos ou os cursos de água (CALOURO, 2000).

#### 3.2.1 Desnitrificação

A desnitrificação consiste na redução biológica dos nitratos ou nitritos a nitrogênio molecular em ambiente anóxico, em que os nitratos e os nitritos funcionam como aceitador final na cadeia de transporte de elétrons, quando uma fonte orgânica de carbono está disponível, sendo a principal via pela qual os compostos inorgânicos oxidados de nitrogênio se convertem em nitrogênio elementar. As bactérias utilizam o oxigênio dos nitratos e dos nitritos para metabolizar estruturas celulares (ECKENFELDER, 1989; ELEFSINIOTIS *et al.*, 2004; WEF, ASCE, EWRI, 2005). A desnitrificação origina perdas de nitrogênio significativas dos ecossistemas agrícolas contribuindo para a redução da eficiência de uso do nitrogênio. Alguns gases formados durante a desnitrificação têm forte implicação na química da atmosfera e elevado significado ambiental (FIRESTONE, 1982).

### 3.2.2 Volatilização da amônia

As perdas de amônia estão muito dependentes dos fertilizantes utilizados e das condições de aplicação. A incorporação é fundamental para se reduzirem as perdas, bem como textura (devido à capacidade de troca catiónica e de fixação), pH e umidade do solo. As condições ambientais são também importantes, designadamente a velocidade do vento (FRANCIS *et al.*, 2008).

O  $\text{NH}_3^+$  é o gás alcalino mais abundante na atmosfera. Reage com ácidos para formar  $\text{NH}_4^+$ . O tempo de residência na atmosfera é curto (< 9 dias), de onde é removido na forma de  $\text{NH}_3^+$  por deposições atmosféricas secas e na forma de sais de  $\text{NH}_4^+$  contido em aerossóis por deposições atmosféricas húmidas (FRANCIS *et al.*, 2008). Com exceção de situações de toxicidade de  $\text{NH}_3^+$  próximo de fontes emissoras, a deposição de  $\text{NH}_3^+$  pode ter efeitos benéficos nas plantas por fornecimento de nitrogênio ou efeitos negativos no ambiente por acidificação do solo, eutrofização das águas e/ou desequilíbrios biológicos nos ecossistemas (WERNER, 2007).

### 3.2.3 Lixiviação

Por lixiviação de nitrogênio entende-se a perda do elemento na água de percolação pelo perfil do solo para fora do alcance das raízes e posteriormente para as águas superficiais e subterrâneas. O íon nitrato é muito suscetível a lixiviação por ser muito solúvel em água e estar carregado negativamente pelo que não é adsorvido pelo complexo coloidal do solo onde domina um balanço de cargas negativas. Em solos arejados, o nitrogênio estabiliza no solo na forma  $\text{NO}_3^-$ , sendo também por isso muito vulnerável à lixiviação. A magnitude do fenómeno depende da dose e momento da aplicação do fertilizante nitrogenado, textura do solo e gestão da rega e ocorrência de precipitação (MULLA e STROCK, 2008; HAVLIN *et al.*, 2014).

A maior implicação ambiental da perda de nitratos por lixiviação é a eutrofização das águas superficiais, com riscos de grande desenvolvimento de vegetação aquática que pode reduzir os níveis de oxigênio na água durante o processo de decomposição (WERNER, 2007).

### 3.3 EFICIÊNCIA DE UTILIZAÇÃO DOS NUTRIENTES

Um dos desafios da atual agricultura consiste no emprego de sistemas sustentáveis de produção que diminuam as perdas, em especial dos fertilizantes, visando o uso eficiente destes, para que a produtividade seja compatível com os investimentos realizados, de modo a alcançar a máxima produtividade econômica.

A eficiência é definida como a capacidade de determinado genótipo em adquirir o nutriente para incorporá-lo e utilizá-lo na produção de biomassa ou material vegetal de rendimento econômico, como os grãos, no caso específico dos cereais. Os critérios ou definições de eficiência são vários e, geralmente, dividem-se entre os que enfatizam a produtividade e aqueles que enfatizam o requerimento interno do nutriente na planta, dependentes das características morfológicas, bioquímicas e fisiológicas dos vegetais (BLAIR, 1993).

Os fertilizantes são responsáveis por aproximadamente metade da produção mundial das culturas, fornecendo alimento, forragem, fibra e combustível alternativo para uma população global. A maior parte dos fertilizantes vem de matérias-primas de ocorrência natural que contêm minerais que são explorados ou extraídos em várias localidades. Uma exceção é o nitrogênio que é produzido por meio da combinação do  $N_2$  do ar com gás natural (mais comum), carvão, ou nafta para formar amônia anidra, que pode ser usada diretamente como fertilizante ou convertida para outra forma de fertilizante nitrogenado (IFA, 2016).

A ureia, sendo um fertilizante nitrogenado, possui alta concentração e baixo custo por unidade de nitrogênio, sendo assim ela é a principal fonte de nitrogênio utilizada atualmente. De acordo com a International Fertilizer Association (IFA, 2017) o consumo mundial de ureia representa 57,6% dos fertilizantes nitrogenados. No entanto, o aproveitamento do nitrogênio não pode ser total devido a perdas que podem ocorrer por volatilização, lixiviação e desnitrificação, quando aplicada a ureia sobre a superfície do solo.

Com base na sua origem, os fertilizantes podem ser subdivididos em fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. Os fertilizantes minerais são de origem mineral ou obtidos por meio de processos industriais físicos e/ou químicos, os fertilizantes orgânicos são de origem animal e/ou vegetal, e os fertilizantes organominerais são obtidos através da mistura mecânica de fertilizantes minerais e orgânicos (decreto-lei n.º 103/2015).

### 3.4 FERTILIZAÇÃO E NUTRIÇÃO NA CULTURA DO MILHO

O milho durante o seu crescimento e desenvolvimento é limitado por fatores como a disponibilidade de água, temperatura e radiação solar. Para que o mesmo atinja o seu máximo potencial produtivo, é fundamental que a temperatura, precipitação pluviométrica e fotoperíodo alcancem os níveis considerados ótimos (PEREIRA FILHO, 2010).

Apesar de ser uma cultura bem adaptada a climas secos, o milho é muito exigente em água. Durante o seu ciclo pode consumir até 600 mm de água. Contudo, pode ser cultivado onde as precipitações variem de 250 mm até 5.000 mm anuais. A quantidade de água utilizada pela planta varia segundo as condições em que se desenvolve (CRUZ *et al.*, 2006).

No caso de haver um déficit hídrico na cultura, todas as fases do seu ciclo são afetadas. Na fase do crescimento vegetativo, devido ao menor alongamento celular e à diminuição da massa vegetativa, ocorre uma baixa na taxa fotossintética. A produção de grão também é afetada pela falta de água, pois a menor massa vegetativa limita a produção de fotoassimilados (PEREIRA FILHO, 2010).

De todos os fatores ambientais, um dos que mais determina o potencial produtivo do milho é a radiação solar. Este fator é de extrema importância, pois dele depende o processo fotossintético, já que 90% da matéria seca do milho provêm da fixação de CO<sub>2</sub> pela fotossíntese. Assim, redução da intensidade luminosa em 30% a 40% por longos períodos retarda a maturação do grão e origina uma queda na produção (CRUZ *et al.*, 2006).

De entre os nutrientes, o nitrogênio é o mais requerido pela cultura do milho e possui importantes funções no metabolismo da planta. Os desperdícios e a escassez do nitrogênio podem gerar problemas econômicos, ambientais, de saúde pública e de segurança alimentar. Dessa forma, a seleção de cultivares que possuem a capacidade de absorver e utilizar nitrogênio de modo eficiente e o uso de fertilizantes com mecanismos que permitem controlar a liberação de nutrientes são uma estratégia que pode ser utilizada para melhor aproveitar o nitrogênio na cultura do milho, incrementar a produção, reduzir os custos com insumos e o efeito no meio ambiente.

O manejo da adubação nitrogenada deve suprir a demanda da planta nos períodos críticos, maximizar a percentagem de recuperação do nitrogênio e

minimizar o impacto no ambiente pela redução de perdas (FERNANDES e LIBARDI, 2007).

### 3.5 IMPORTÂNCIA DO NITROGÊNIO PARA A CULTURA DO MILHO

De todos os fatores ambientais, o solo é fundamental para o crescimento das plantas, pois para além de dar suporte em termos de fixação, o mesmo pode reservar água e fornecer nutrientes às plantas. Os solos apresentam diferentes níveis de fertilidade e capacidade de fornecer nutrientes às plantas. Nenhum solo consegue fornecer todos os nutrientes às plantas, pelo menos nas quantidades necessárias, com isso o uso de fertilizantes se torna indispensável no crescimento das culturas. O nitrogênio é um dos nutrientes mais limitantes no solo e um dos mais requeridos pelas plantas cultivadas. O milho é um exemplo de cultura onde o nitrogênio é empregado em grandes quantidades, na forma de fertilizantes minerais (CIVARDI *et al.*, 2011).

O nitrogênio é um nutriente altamente consumido pelas plantas e presente em diferentes moléculas orgânicas, como proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucleicos e outros citocromos (HASEGAWA *et al.*, 2008). A sua presença nos tecidos vegetais do milho pode representar 1-4% da matéria seca (ONASANYA *et al.*, 2009). De particular importância é o aumento no teor de clorofila das folhas de milho que se observa pela aplicação de nitrogênio em comparação com plantas não fertilizadas (RAMBO *et al.*, 2010).

O nitrogênio pode ser absorvido pelas plantas em duas formas distintas, designadamente como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e como amônio ( $\text{NH}_4^+$ ). O nitrogênio é absorvido pelas plantas de milho, principalmente, na forma nítrica, que posteriormente é reduzida a amônio, num processo onde estão envolvidas duas enzimas, a redutase de nitrato (ativada pelo molibdênio) e a redutase de nitrito (ativada pelo enxofre), sendo que a primeira é responsável pela transformação de nitrato em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e a segunda pela transformação de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) em amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), para posterior assimilação em aminoácidos (YAMADA, 2000). Sua absorção pelo milho é mais intensa no período entre 40 e 60 dias após a germinação, embora a planta absorva uma pequena quantidade na germinação e após o início do florescimento, caracterizando dessa forma três fases para absorção: uma fase no crescimento inicial lento (germinação); uma fase no crescimento rápido onde 70 a 80% de toda a matéria seca é acumulada; e uma última fase de absorção na qual o

crescimento é novamente lento acumulando cerca de 10% de massa seca total da planta (MAGALHÃES,1979; MACHADO *et al.*, 1982; FRANÇA *et al.*, 1994; VASCONCELLOS; VIANA; FERREIRA, 1998). Portanto, as exigências de nitrogênio pelo milho são mínimas nos estádios iniciais, aumentando com a elevação da taxa de crescimento e alcançando um pico durante o florescimento até o início de formação dos grãos (ARNON, 1975). Isso se torna um fator importante na utilização dos fertilizantes de eficiência aumentada.

A deficiência de nitrogênio tipicamente reduz o crescimento, as folhas ficam menores e as plantas ganham aspecto clorótico que se inicia nas folhas mais velhas, na medida em que o nitrogênio disponível é remobilizado para as partes em crescimento. Em deficiência de nitrogênio o crescimento radicular é mantido ou estimulado, reduzindo-se a relação parte aérea/raiz (VARENNE, 2003). Em deficiência os nitratos são metabolizados, reduzindo-se os seus níveis na planta, estimulando a capacidade de absorção. À medida que a deficiência progride a clorose acentua-se, ocorre destruição de ácidos nucleicos e proteínas, e as folhas velhas senescem e caem prematuramente (HAWKESFORD *et al.*, 2012; BRYSON *et al.*, 2014; HAVLIN *et al.*, 2014).

Já o excesso de nitrogênio resulta em desenvolvimento luxuriante, o que pode tornar as plantas suscetíveis a ataques de fungos e a acama fisiológica e atração de uma grande variedade de insetos (HAWKESFORD *et al.*, 2012).

Quando o  $\text{NH}_4^+$  é a forma dominante no solo, pode ocorrer sintoma de toxicidade. A toxicidade de  $\text{NH}_4^+$  é caracterizada por crescimento radicular reduzido, podendo resultar rutura dos tecidos vasculares e dificuldade na absorção de água. Nas folhas pode ocorrer clorose, necrose, epinastia (crescimento invertido de folhas e caules) e lesões nos caules. Associado ao excesso de  $\text{NH}_4^+$  no solo pode ocorrer desequilíbrios nutricionais como deficiência de potássio, cálcio e magnésio (BRYSON *et al.*, 2014).

A cultura de milho tende a ter uma recomendação para a adubação nitrogenada em cobertura variável entre 40 e 80 kg de N  $\text{ha}^{-1}$ , sendo que, para um cultivo de milho em que o uso da alta tecnologia prevalece, com o objetivo de alcançar uma produtividade mais elevada, as doses de nitrogênio a serem aplicadas podem variar de 100 a 200 kg  $\text{ha}^{-1}$ . Contudo, a aplicação de quantidades elevadas de nitrogênio durante o ciclo da cultura está sujeito a maiores perdas, uma vez que a planta tem capacidade de absorvê-lo apenas até certa quantidade. A parte que não

é absorvida será perdida por meio de processos que ocorrem no ambiente, designadamente lixiviação, desnitrificação de nitratos e volatilização de amônio (MARTIN *et al.*, 2014).

### 3.6 FERTILIZAÇÃO MINERAL

Para Malavolta *et al.*, (2002) os fertilizantes minerais são produtos de natureza inorgânica, naturais ou sintéticos, fornecedores de nutrientes vegetais. Os fertilizantes minerais mais utilizados na agricultura mundial têm como base os elementos nitrogênio, fósforo e potássio.

Segundo Silva (1982) os elementos essenciais são divididos em: macronutrientes primários, aqueles que as plantas absorvem em maior quantidade e que no solo não costumam estar disponíveis em quantidades suficientes para satisfazer as necessidades nutritivas das plantas (N, P e K); macronutrientes secundários, aqueles que mesmo absorvidos em grandes quantidades pelas plantas estão normalmente presentes no solo em quantidades suficientes (Ca, Mg e S); e os micronutrientes, sendo elementos que são absorvidos pelas plantas em quantidades menores, mesmo assim podem causar algum sintoma nas plantas se estiverem em falta ou em excesso (B, Cl, Cu, Fe, Mn, Mo, Zn).

Ter conhecimentos básicos dos macronutrientes (sua importância, sintomas causados pela sua deficiência, seu comportamento no solo e suas fontes disponíveis) aliado ao conhecimento dos níveis adequados de nutrientes no solo e as necessidades de cada cultura, pode auxiliar na orientação para adubação mais adequada a cada realidade, com melhor relação custo/benefício para o agricultor.

O nitrogênio é o nutriente mais exigido pelas culturas, superando em quantidade o potássio e fósforo (RAIJ, 1991). É um elemento de baixa eficiência de aproveitamento por ser um elemento muito dinâmico no solo (ocorrências de várias formas químicas e grande variação de estado de oxidação) e por sofrer perdas por volatilização, lixiviação, desnitrificação, escoamento superficial e pela remoção das culturas (DE DATTA, 1981).

Segundo Reetz (2017) o fósforo tem um papel vital na fotossíntese, funcionando na captura e transferência de energia para as ligações químicas. Tecidos meristemáticos jovens têm uma elevada concentração de fósforo. Os materiais genéticos, DNA e RNA, são construídos ao redor da estrutura de átomos

de fósforo, exercendo o elemento um papel fundamental no metabolismo dos açúcares e amidos, todos críticos nos processos de divisão celular e crescimento.

O potássio na planta regula o fluxo de água e outros materiais através das membranas celulares, e ajuda a regular uma grande variedade de processos químicos e enzimáticos. O potássio por si só não forma qualquer composto químico nas plantas, mas atua no balanço iônico das cargas elétricas por se movimentar para dentro e para fora através das membranas celulares. Ao fazer isso, o potássio é essencial para a absorção de nutrientes e movimento através da planta, e na manutenção do balanço hídrico na planta. Ele é, então, essencial para a utilização de outros nutrientes e da água, mesmo que, quimicamente, ele não combine com outros nutrientes (REETZ, 2017).

Enxofre, cálcio e magnésio são considerados nutrientes secundários, pois embora eles sejam essenciais para o desenvolvimento das culturas, a absorção destes é usualmente menor do que os nutrientes primários (N, P e K), mas consideravelmente maior do que os micronutrientes (Zn, Fe, Mn, Cu, B, Mo, Cl e Ni), que são necessários em quantidades muito pequenas, mas ainda são essenciais para o crescimento das plantas. Deficiências de micronutrientes variam com as regiões, com base na mineralogia e no clima e, alguns, podem ser corrigidas pelo ajuste do pH.

Diversos trabalhos demonstram o efeito positivo da adubação NPK nos componentes de produção para a cultura do milho, com benefícios sobre características agronômicas, como diâmetro caulinar, número de grãos/espiga, peso da espiga com e sem palha, rendimento de grãos pela cultura e, ainda, aumento na produção de massa de matéria seca da parte aérea (ARATANI *et al.*, 2006; HARGER *et al.*, 2007; GONÇALVES JÚNIOR *et al.*, 2007; 2008; DEPARIS *et al.*, 2007).

### 3.7 FERTILIZAÇÃO ORGÂNICA

De acordo com Diehl (1989), fertilização orgânica ou fertilizantes orgânicos são produtos de origem animal e/ou vegetal que estão a se decompor no solo para dar origem ao húmus e contribuir, deste modo, para o melhoramento das suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Tanto nos solos naturais como nos solos cultivados, a fração de origem vegetal é predominante, mas a parte dos detritos

animais não é para desprezar, tendo esta um papel importante nos processos biológicos do solo.

O húmus tanto de origem vegetal e/ou animal apresenta uma estrutura orgânica complexa, suscetível de entrar em suspensão coloidal e floculado no solo pelos sais de cálcio e de magnésio. Apresenta propriedades coloidais e carga eletronegativa. A estabilidade das substâncias húmicas é normalmente função da sua relação carbono/nitrogênio, o que o torna benéfico para a absorção de nutrientes e conseqüentemente satisfatório para as plantas cultivadas (DIEHL, 1989).

A presença de matéria orgânica faz com que os fertilizantes orgânicos, em relação aos minerais, tenham a vantagem de veicularem para os solos fatores importantes de fertilidade (SANTOS, 2005).

Dentre os fertilizantes orgânicos, os estrumes de curral são por excelência os mais utilizados por agricultores. Uma das principais vantagens do esterco bovino está no fato de ele contribuir para o melhoramento das condições físicas, químicas e biológicas do solo, podendo ser também usado como alternativa aos fertilizantes minerais e orgânicos para o crescimento e desenvolvimento das mudas (GOMES *et al.*, 2004).

Segundo Nunes (2016) os fertilizantes orgânicos de origem vegetal, tais como a adubação verde, são plantas cultivadas apenas para serem enterradas melhorando o solo com nutrientes, como nitrogênio e principalmente biomassa (matéria orgânica) em quantidades elevadas.

Independentemente da origem dos fertilizantes orgânicos, estes promovem o desempenho das culturas quando aplicados ao solo (KIEHL, 2010).

Para a aplicação de um fertilizante orgânico o mesmo deve se encaixar no Decreto-Lei n.º 103/2015 de 15 de junho, onde diz que um corretivo orgânico é uma matéria fertilizante cuja função principal é a de melhorar as características físicas, químicas e/ou biológicas do solo, com vista ao bom desenvolvimento das plantas.

Os corretivos orgânicos são produtos naturais, sem aditivos químicos que são usados para aumentar ou pelo menos manter os níveis de matéria orgânica no solo, promovendo um efeito positivo no crescimento e produtividade das culturas, incrementando as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, como a retenção da água, o arejamento e o aumento e diversificação da atividade microbiológica do solo (SANTOS, 1991).

### 3.8 FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL DE NUTRIENTES

Novas tecnologias estão sendo implantada a campo com o objetivo de aumentar a eficiência do uso de nitrogênio na agricultura, como o uso de fertilizantes nitrogenados de baixa solubilidade, de liberação lenta, liberação controlada e/ou estabilizados com inibidores de nitrificação.

Os principais objetivos destes fertilizantes são a diminuição das perdas de nutrientes no sistema solo-planta-atmosfera para melhor disponibilizá-los e ajustá-los às necessidades das plantas.

Sendo assim, eles podem aumentar a eficiência do uso de nitrogênio pelas plantas e minimizar impactos ambientais causados pela adubação nitrogenada convencional, reduzindo, por exemplo, a lixiviação dos nitratos para as camadas mais profundas do solo, evitando que estes atinjam o lençol freático e contaminem a água, e diminuindo a emissão de gases causadores do efeito estufa para a atmosfera, como óxidos de nitrogênio e amoníaco.

Os dois tipos de fertilizantes mais conhecidos comercialmente são normalmente confundidos pela sua nomenclatura, que são os fertilizantes de liberação controlada e os de liberação lenta. Para diferenciá-los deve ser utilizado o termo fertilizante de liberação controlada quando se conhece a duração da liberação do nutriente, ou seja, a taxa de liberação da quantidade do nutriente pelo tempo é conhecida. Já para os fertilizantes de liberação lenta não são conhecidos esses parâmetros, os quais são influenciados pelo solo e por condições climáticas, liberando assim os nutrientes em ritmo mais lento em comparação aos convencionais (SHAVIV, 2005).

No mercado os produtos nitrogenados e microbiologicamente degradáveis são referidos como fertilizantes de liberação lenta e os produtos revestidos ou encapsulados são designados fertilizantes de liberação controlada (ULLMANN, 2007).

#### 3.8.1 Fertilizantes de liberação lenta

Os fertilizantes de liberação lenta são definidos como aqueles que, após a sua aplicação, são capazes de retardar a disponibilidade de absorção e uso do nutriente pelas plantas, ou que consigam estender sua disponibilidade à planta por mais tempo do que os convencionais.

Os fertilizantes de liberação lenta envolvem a liberação de nutrientes a uma taxa mais lenta que a dos fertilizantes usuais. No entanto, o padrão e período de liberação não são bem controlados.

Os fertilizantes designados no comércio de liberação lenta são produtos de baixa solubilidade que resultam da condensação da ureia. A ureia-formaldeído é uma das formulações mais importantes. Resulta da reação do formaldeído com excesso de ureia da qual resulta uma mistura de metileno-ureias com polímeros de cadeia longa (formam-se várias moléculas com cadeias de diferente comprimento). Parte é solúvel em água e fica rapidamente disponível e outra parte é liberada de forma gradual por um período mais longo (TRENKEL, 1997).

O atraso na disponibilidade inicial ou no tempo prolongado da disponibilidade do fertilizante pode ocorrer por três fatores: variedade de mecanismos que incluem solubilidade controlada do material em água através dos revestimentos com materiais de proteína semipermeáveis ou outras formas químicas; hidrólise lenta de compostos hidrossolúveis de baixo peso molecular; e/ou por outros meios desconhecidos (MOTA, 2013).

Conforme Trenkel (2010), o Comitê Europeu de Normalização estabelece que para um fertilizante ser considerado de liberação lenta, os três seguintes critérios devem ser atendidos, na temperatura de 25° C: não mais que 15% liberado em 24 horas; não mais que 75% liberado em 28 dias; e no mínimo 75% de liberação no prazo fixado pelo fabricante.

### 3.8.2 Fertilizantes de liberação controlada

Os fertilizantes de liberação controlada são fertilizantes solúveis convencionais rapidamente disponibilizados para o solo, como a ureia, que são revestidos ou encapsulados por materiais orgânicos ou inorgânicos capazes de controlar a liberação do nitrogênio.

A velocidade de liberação dos fertilizantes de liberação controlada acontece por causa da hidrólise lenta de compostos hidrossolúveis de baixo peso molecular, os mecanismos que controlam a solubilidade do material em água, da qualidade do revestimento, do tipo de material utilizado para revestir, do método empregado para confecção do fertilizante ou por outros meios pouco conhecidos patenteados pelas empresas detentoras da tecnologia. Fatores como a espessura da resina, presença de microfissuras em sua superfície e o tamanho do grânulo influenciam a

durabilidade e intensidade de liberação do nitrogênio. A liberação total de nutriente pode variar de alguns meses até dois anos (OERTLI, 1980; GIRARDI e MOURÃO FILHO, 2003).

Dentro dos fertilizantes de liberação controlada os que resultam de revestimentos da ureia com enxofre (SCU - Sulfur Coated Urea) foram os primeiros a ser desenvolvidos à escala comercial. Os SCU são fertilizantes solúveis que após granulação são envoltos num revestimento de proteção para controlar a entrada de água e reduzir a dissolução do nutriente. Degradam-se lentamente no solo por processos microbiológicos, químicos e físicos. Nos fertilizantes revestidos com polímeros usam-se membranas impermeáveis ou semi-impermeáveis com poros finos (poliuretanos, poliésteres, resinas). A maior parte dos polímeros decompõe-se muito lentamente (TRENKEL, 2007).

Os fertilizantes nitrogenados de liberação controlada podem aumentar a produtividade da cultura, além de reduzir a aplicação de nitrogênio e a perda de nitrogênio por lixiviação e volatilização (CANTARELLA e MARCELINO, 2008).

### 3.8.3 Fertilizantes estabilizados

Os fertilizantes nitrogenados estabilizados são aqueles em que é adicionado algum aditivo capaz de inibir a transformação do nitrogênio em alguma forma não desejável (AAPFCO, 1997). Estes aditivos, também chamados de estabilizantes, são substâncias que aumentam o tempo em que o nitrogênio permanece em uma determinada forma, seja ela ureia ou amônio (TRENKEL, 2010).

Segundo Trenkel (2010) os fertilizantes estabilizados são divididos em duas categorias: os inibidores da nitrificação (substância que inibe a oxidação biológica do nitrogênio de amônio a nitrato); e inibidores da urease (substância que inibe a atividade da enzima urease, retardando o processo de hidrólise da ureia, em condições adversas de clima, reduzindo a volatilização de amônia).

O desenvolvimento desses fertilizantes podem se tornar caros e demorados, pois eles apresentam características de não ter efeitos colaterais desfavoráveis na fertilidade do solo, sem toxicidade para o solo, plantas, animais e seres humanos. Se enquadram nos sistemas de produção dos produtores por serem ambientalmente corretos, mas podem até ser economicamente viáveis por diminuir as perdas (TRENKEL, 2010).

### 3.8.3.1 Inibidores de nitrificação

Os inibidores da nitrificação bloqueiam a ação de bactérias do gênero *Nitrosomonas* na oxidação do  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ , visando manter o nitrogênio na forma amoniacal por mais tempo e, assim, reduzir perdas por desnitrificação e por lixiviação de nitrato (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

Segundo Reetz (2017), a adição de inibidores da nitrificação na ureia permite que o fertilizante nitrogenado aplicado permaneça no solo perto da zona das raízes por um período mais longo e, em consequência, criando melhores condições para absorção pela planta do que no caso da aplicação isolada de ureia, assim como reduzir o potencial de perdas de nitrogênio do sistema solo-planta para o meio ambiente. Entretanto, a eficiência desses inibidores no aumento da produtividade e melhoria no teor de proteína nos grãos são afetados por vários fatores de solo e ambientais.

### 3.8.3.2 Inibidores da urease

O uso de fertilizantes nitrogenados estabilizados contendo inibidores da urease tem aumentado nos últimos anos, uma vez que a ureia é o fertilizante nitrogenado sólido mais importante no mercado mundial e há chance de ocorrer grandes perdas de  $\text{NH}_3^+$  quando este fertilizante é aplicado na superfície dos solos (CANTARELLA; MONTEZANO, 2010).

O N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) é uma substância inibidora da urease que vem se apresentando como uma das mais promissoras para a maximização do uso do nitrogênio da ureia em sistemas agrícolas (CHIEN; PROCHNOW; CANTARELLA, 2009). Quando em contato com o solo, o NBPT decompõe-se rapidamente a NBPTO (N-(n-butil) fosfórico triamida), tornando-se, assim, capaz de inativar a urease pela substituição das moléculas da água próximas ao seu sítio ativo, ligando-se aos átomos de níquel (KRAJEWSKA, 2009). O NBPT pode inibir a hidrólise da ureia por períodos de 7 a 14 dias dependendo dos atributos do solo, tais como pH, umidade inicial, temperatura e outras condições ambientais (DAWAR *et al.*, 2011; HENDRICKSON; DOUGLASS, 1993; SANZ-COBENA *et al.*, 2008).

### 3.9 ESTUDOS COM FERTILIZANTES DE LIBERAÇÃO GRADUAL

Segundo Timilsen *et al.*, (2014), os fertilizantes de liberação gradual apresentam as vantagens de reduzir as aplicações de fertilizantes, economizar o custo de mão-de-obra, permite aumentar os rendimentos e reduzir a poluição ambiental. Entretanto, apesar das vantagens, e de acordo com Bley (2015), esses produtos ainda possuem utilização limitada. Superar alguns desafios como o alto valor do produto, comprovação da eficiência agrônômica e conscientizar a sociedade sobre a importância ambiental são fundamentais para ampliar a utilização.

Walters e Malzer (1990), em ensaios na cultura do milho no estado de *Minnesota* utilizando a nitropiridina como inibidor da nitrificação, verificaram haver interação entre o clima, quantidade de nitrogênio aplicado (90 e 180 kg há<sup>-1</sup>, na forma de ureia), localização do fertilizante e inibidor da nitrificação. Concluem ainda que, numa estação de crescimento favorável e elevado potencial para lixiviação, os aumentos de produção pela aplicação do inibidor da nitrificação verificam-se, nas doses mais baixas de nitrogênio e que a utilização do inibidor resulta em ganhos de produção, apenas, se a quantidade de nitrogênio aplicado for inferior às quantidades normalmente recomendadas para a região (200 kg há<sup>-1</sup>).

Rodrigues *et al.*, (2010), estudaram a eficiência de fertilizantes de liberação lenta na cultura da couve (*Brassica oleracea*), com três distintos mecanismos de liberação de nutrientes, sendo eles: ureia condensada (isobutilideno diureia), inibidor de nitrificação (fosfato de 3,4-dimetilpirazole) e revestimento com polímero (fertilizante de liberação controlada). Ao final do estudo, os autores concluíram que, do ponto de vista agrônômico, nenhum dos mecanismos de liberação gradual de nitrogênio forneceu vantagens sobre a ureia, a qual é a forma de nitrogênio mais utilizada.

Civardi *et al.*, (2011), utilizando fertilizantes nitrogenados convencionais e com e sem revestimento com polímeros, relataram que a forma de aplicação, a dose e a fonte da ureia utilizada em cobertura no milho tiveram efeito significativo sobre o rendimento de grãos, onde a maior produtividade foi obtida com a ureia incorporada, seguida de maior dose (49,44 kg ha<sup>-1</sup>) de ureia polimerizada em superfície. Sendo assim a redução da dose de ureia revestida com polímeros promove redução no rendimento de grãos do milho.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

O experimento foi implantado no dia 15 de maio de 2018 em uma área experimental do Instituto Politécnico de Bragança na localidade de Bragança, NE Portugal (41°46'49"\_N; 6°47'54"\_W), com altitude de 708 m, e a condução do experimento ocorreu até outubro de 2018.



Figura 2 – Imagem do local de implantação do experimento (GOOGLE, 2018).

Esta região apresentou em 2018 uma temperatura média anual de 12,8 °C, onde que no mês mais quente, agosto, apresentou temperatura média de 23,4 °C. No mês mais frio, fevereiro, a temperatura média foi de 4,5°C. A precipitação média de 2018 foi de 58,8 mm com um total anual de 706 mm, sendo o mês mais chuvoso março com uma precipitação de 193,7 mm, tendo o mais seco agosto, registado 0 mm de precipitação. Segundo a classificação de Koppen, Bragança possui clima do tipo Csb (clima temperado com verão seco e suave) (IPMA, 2018). Os registos de precipitação e temperatura médias mensais são apresentados na figura 3.

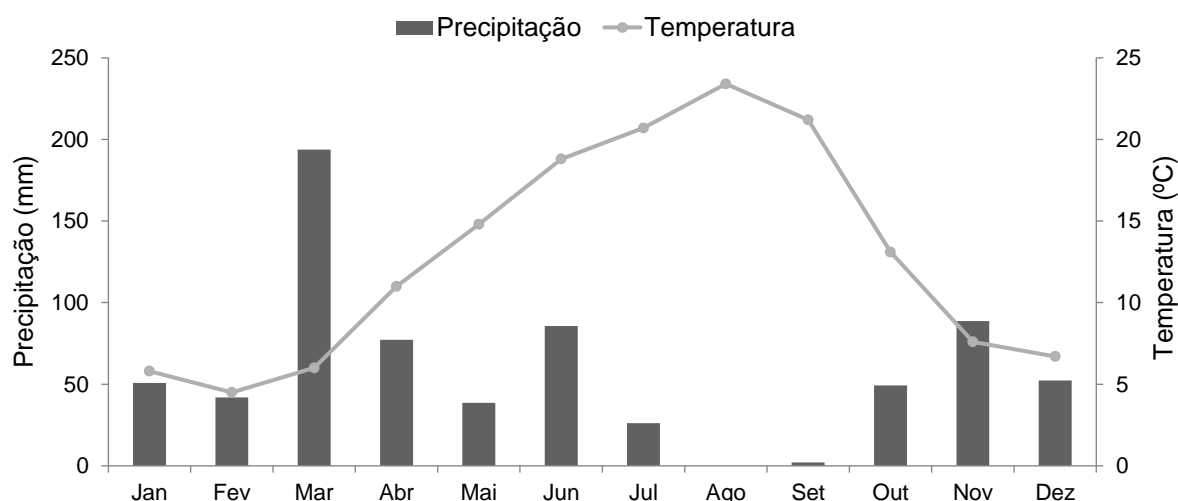


Figura 3 – Precipitação e temperatura média do ar mensais da cidade de Bragança entre janeiro e dezembro de 2018 (ESA - IPB, 2018).

## 4.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os ensaios foram conduzidos em delineamento experimental completamente casualizado. Os tratamentos foram constituídos usando três fertilizantes comerciais, um estrume de curral e uma testemunha não fertilizada. As designações comerciais dos fertilizantes utilizados são Nitro 27 (27% N, 50%  $\text{NH}_4^+$ , 50%  $\text{NO}_3^-$ ) um fertilizante mineral (nitrate de amônio) em três doses (50, 100 e 200 kg N  $\text{ha}^{-1}$ ), Exactyon® 12-10-18 um fertilizante composto NPK de liberação controlada e Entec® 26 um fertilizante estabilizado com um inibidor da nitrificação, ambos nas doses de 100 e 200 kg N  $\text{ha}^{-1}$ . E um corretivo orgânico (estrume de vaca) em uma dose correspondente à aplicação de 100 kg N  $\text{ha}^{-1}$ . Assim, foram constituídos nove tratamentos fertilizantes incluindo a testemunha. Cada tratamento foi replicado três vezes, totalizando 27 unidades experimentais (27 parcelas). Cada parcela apresentou um arranjo espacial de 5 m x 4 m totalizando 20 m<sup>2</sup> por parcela.

## 4.3 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

O solo do local do experimento estava integrado numa rotação octoanual de regadio, num sistema ley-farming, em que o solo é ocupado durante quatro anos por uma pastagem temporária e em que durante outros quatro anos se cultivam milho em monocultura. O preparo do solo consistiu de uma aragem e uma gradagem com retirada das pedras maiores do terreno. A pesagem dos fertilizantes decorreu no

laboratório de solos e a aplicação dos fertilizantes realizou-se a lanço, tendo sido incorporados com um escarificador.

A cultivar utilizada foi um híbrido Monero FAO 500, um híbrido de grande porte, com elevado potencial em grão e silagem, com espigas compridas e de grande diâmetro. Excelente sanidade e foi escolhido pela adaptabilidade à duração da estação de crescimento para produção de forragem. Foi semeado na densidade de 80.000 planta por hectare (compasso 0,7 x 0,18 m).

Entre os estádios fenológicos V4 e V6, no dia 18 de junho, realizou-se a aplicação de um herbicida de absorção foliar em pós-emergência, designadamente o produto comercial Laudis, cuja formulação é uma dispersão em óleo de 22 g L<sup>-1</sup> de isoxadifene-etilo e 44 g L<sup>-1</sup> de tembotriona. Foi aplicado na concentração de 0,5 L hL<sup>-1</sup> e 2 L ha<sup>-1</sup>.

O experimento contou com um pivô central para irrigação da cultura, pois na época do experimento a precipitação foi muito variável, com um mês com mais de 100 mm e outro sem nenhuma precipitação. Na ausência de precipitação foram efetuadas regas semanais com dotação de 40 mm durante os meses de junho, julho e agosto, totalizando um aproximado de 400 mm de água suplementada, distribuída por dez eventos de rega durante a estação de crescimento.



Figura 4- Implantação do experimento.

#### 4.4 TRATAMENTOS FERTILIZANTES

Na tabela 1, encontra-se descrito os tratamentos e as doses juntamente com a quantidade de fertilizante aplicada na base e em cobertura no experimento.

Tabela 1 - Tratamentos do experimento constituídos por fertilizantes orgânicos, mineral e liberação gradual. Bragança, 2018.

Tratamento	Fertilizante	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Adubação de Base + Cobertura (kg N ha <sup>-1</sup> )	Fósforo + Potássio (kg ha <sup>-1</sup> )
Test	Testemunha	-	-	-
Org 100	Corretivo Orgânico	100	0 + 100	100 + 100
NA 50	Nitro 27	50	25 + 25	150 + 150
NA 100	Nitro 27	100	50 + 50	150 + 150
NA 200	Nitro 27	200	100 + 100	150 + 150
LC 100	Exactyon ® 12-10-18	100	100 + 0	0 + 0
LC 200	Exactyon ® 12-10-18	200	200 + 0	0 + 0
FE 100	Entec ® 26	100	100 + 0	150 + 150
FE 200	Entec ® 26	200	200 + 0	150 + 150

Em seguida fornece-se informação suplementar sobre cada um dos fertilizantes.

**Corretivo orgânico** - O corretivo orgânico utilizado no experimento foi um estrume de vaca proveniente da própria exploração, resultando da cama dos animais, em que inclui as fezes e urinas misturas com camas de palha de cereais e restos de feno. O material foi posteriormente compostado ao ar livre com reviramento periódico. A sua composição é apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Composição do fertilizante orgânico utilizado no ensaio, com base nas análises laboratoriais efetuadas no início dos ensaios.

Fertilizante - Orgânico					
<b>N (%)</b>	2,50	<b>Ca (%)</b>	1,03	<b>Fe (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	9.398,02
<b>P (%)</b>	0,72	<b>Mg (%)</b>	1,73	<b>Zn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	162,40
<b>K (%)</b>	2,55	<b>B (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	50,63	<b>Mn (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	423,31
<b>C/N (%)</b>	12,72	<b>Cu (mg kg<sup>-1</sup>)</b>	45,04		

**Nitro 27 (Nitrato de amônio 27% N)** - É um fertilizante nitrogenado, composto por nitrato de amônio (50% N nítrico e 50% de N amoniacal) e diluído com

calcário (4% MgO). É um fertilizante granulado nitrogenado que garante um fornecimento de nitrogênio imediato às culturas devido à sua elevada solubilidade em água. A combinação de nitrogênio amoniacal e de nitrogênio nítrico faz deste produto um fertilizante de utilização universal. A excelente granulação e o tratamento especial de superfície dos grãos garantem uma estabilidade ótima de armazenamento e excelentes características de espalhamento.

A combinação de nitrogênio nítrico de ação imediata e de nitrogênio amoniacal com um efeito em longo prazo faz deste o fertilizante ideal para as culturas com altas necessidades de nitrogênio. O nutriente colocado no solo é absorvido diretamente pela planta pelo que as perdas de nitrogênio podem ser reduzidas. A combinação de nitrogênio nítrico e amoniacal faz dele um fertilizante que pode ser usado em adubação de fundo ou em cobertura.

**Exactyon 12-10-18 (Fertilizante de liberação controlada)** - Exactyon faz parte de uma gama de fertilizantes de liberação controlada de longa duração (aproximadamente 8 a 9 meses), indicado para a fertilização de fundo.

Apresentando grânulos revestidos com uma cápsula de polímero orgânico, extremamente segura e resistente, e combina distintas espessuras no revestimento para que estes sejam disponibilizados à planta de forma escalonada ao longo do tempo. Assim, grande parte do fósforo e também uma parte do potássio irão ser disponibilizados nos primeiros meses após a plantação, para um excelente enraizamento das plantas e para um arranque ótimo. O nitrogênio irá sendo disponibilizado de uma forma contínua ao longo dos seis meses de duração do fertilizante.

**Entec 26 (Fertilizante estabilizado inibidor da nitrificação)** - É um fertilizante nitrogenado composto por 26% de nitrogênio (7,8% nitrogênio nítrico + 18,5% de nitrogênio amoniacal) e 32,5% de SO<sub>3</sub>. O fertilizante incorpora como inibidor da nitrificação a molécula 3,4-dimetil-1H-pirazolfosfato (DMPP). Os grânulos apresentam tamanho médio de 3 mm e com teor de 0,7% de água.

Os fertilizantes com inibidor de nitrificação retardam a conversão de amônia em nitratos reduzindo o risco de lixiviação de nitratos. Podem melhorar a nutrição das plantas, com menores perdas de nitrogênio por lavagem e, conseqüentemente, redução da contaminação das águas. A duração do efeito depende do clima e da atividade biológica do solo, mas pode prolongar-se por várias semanas.

**Testemunha** - A testemunha consistiu em um tratamento sem adição de nenhum produto fertilizante, mantendo as características originais do solo para futura comparação com os outros tratamentos utilizados e para calcular índices de eficiência de uso do nitrogênio.



Figura 5 – Aspecto visual dos fertilizantes. A – Nitro 27, B – Entec 26 e C – Exactyon 12-10-18

## 4.5 DETERMINAÇÕES EM CAMPO

### 4.5.1 Concentração de clorofila pelo SPAD

A intensidade da cor verde das folhas do milho foi determinada com o objetivo de avaliar o estado nutricional de nitrogênio nestas, usando um aparelho portátil SPAD (*Soil Plant Analysis Development*). O SPAD é um equipamento usado para indicar o conteúdo relativo de clorofila nas folhas. Mede a transmitância da luz através das folhas das plantas.

O SPAD, como um índice de verde ou concentração relativa de clorofila, mede a diferença de luz transmitida na folha por meio de dois detectores nos comprimentos de 650 nm e 940 nm. A luz transmitida a 650 nm (luz vermelha) está associada aos comprimentos de onda das clorofilas a e b (645 nm e 663 nm, respectivamente), não sendo influenciada pelos carotenoides, enquanto a transmitida a 940 nm (infravermelho próximo) serve como medida de ajuste interno para as condições de umidade e espessura de folha (EMBRAPA CERRADOS, 2008).

Uma limitação para o caso do milho é que as leituras do clorofilômetro realizadas em estádios iniciais (V4 a V6) podem não ser consistentes para o diagnóstico nutricional de nitrogênio, conforme reportado por Argenta *et al.*, (2002). Por este motivo o aparelho de SPAD foi utilizado em campo no dia 28 de julho de 2018, quando a cultura já estava no estágio fenológico V7 (sete folhas desenvolvidas) e utilizadas as folhas da parte média das plantas.



Figura 6 - Clorofilômetro Minolta (modelo SPAD-502), utilizado nas avaliações de teores de clorofila no experimento.

#### 4.5.2 Índice de vegetação pelo NDVI

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é um índice da condição da vegetação no campo determinado através de sensoriamento remoto. É um indicativo do estado da planta porque leva em consideração a energia absorvida com a refletida na região que mostra a condição das estruturas celulares.

O índice de vegetação utilizado no trabalho foi o NDVI que é definido pela seguinte equação  $NDVI = \frac{(\text{Infravermelho Próximo} - \text{Vermelho})}{(\text{Infravermelho Próximo} + \text{Vermelho})}$ . Essa equação gera um índice que varia de -1 a 1. Valores  $> 0$  são vegetação e valores  $< 0$  são outros objetos.

O aparelho de NDVI foi utilizado em campo no dia 28 de julho de 2018, quando a cultura estava no estágio fenológico V7, e foram utilizadas as folhas superiores das plantas, tomando por referência a folha mais jovem com o limbo completamente expandida (colar visível).



Figura 7 – Utilização do aparelho de NDVI a campo.

#### 4.5.3 Amostragem de folhas

Coletaram-se folhas jovens com o limbo completamente expandido, quando a cultura estava no estágio fenológico V7. Após a colheita das folhas, as mesmas foram levadas ao laboratório, onde foram secas em estufa de ventilação forçada a 65 °C. Após secas, foram moídas em moinho com malha de 1 mm. Posteriormente procedeu-se a determinação da composição elementar dos tecidos.



Figura 8 – Amostras de folhas colhidas a campo.

#### 4.5.4 Amostragem de solo

No experimento foram coletadas amostras de solo com profundidade de 0 a 20 cm em duas datas, 07 junho de 2018 quando a cultura estava no estágio fenológico V4 antes da aplicação em pré-cobertura e no dia 25 de outubro de 2018 após a colheita das plantas. Posteriormente as amostras foram levadas ao laboratório de solos e mantidas em um frigorífico até as análises se realizarem. As amostras foram crivadas em peneira com malha de 2 mm e parte delas foram secas em estufa com circulação forçada a 40 °C. Após isto foram sujeitas a diversas determinações analíticas.

#### 4.5.5 Produtividade

Para avaliar a produtividade da cultura do milho no experimento foi coletada uma quantidade de planta que representasse 1m linear (0,7 m<sup>2</sup>), feito a pesagem das amostras em fresco e retirado uma sub amostra para secar em estufa a 65 °C e com o valor obtido foi realizado uma estimativa de produção de matéria seca por hectare.

### 4.6 ANÁLISES LABORATORIAIS

Amostras iniciais de todos os solos usadas nas experiências de campo, colhidas na profundidade 0-20 cm foram levadas ao laboratório, crivadas em malha de 2 mm, sendo parte destas secas em estufa a 40 °C e parte mantidas em frigorífico para posterior análise.

Amostras de tecidos vegetais diversas, designadamente folhas, caules e planta inteira, foram recebidas em laboratório, secas em estufa com ventilação forçada, regulada a 65 °C, moídas em um moinho Cyclotec com uma malha de 1 mm e analisadas para determinação da composição elementar.

#### 4.6.1 Análises nos solos

**Textura** - Após agitação de uma porção de solo (fração inferior a 2 mm) com um agente dispersante, a areia grossa foi separada de limo e argila. Limo e argila foram determinados pelo método da pipeta. A suspensão foi colocada numa proveta de 1000 mL. As partículas sedimentaram ao longo do tempo de acordo com o seu tamanho e posicionam-se em diferentes profundidades da proveta. A pipeta serve

para recolher uma amostra de solo e argila nos primeiros centímetros a contar da superfície e depois para recolher limo + argila. As suspensões foram depois secas a 105 °C e avaliada a percentagem de cada fração na amostra de solo (REEUWIJK, 2002). A areia fina foi determinada por diferença entre 100 e o somatório das percentagens de areia grossa, argila e limo.

**pH em água** - Preparou-se uma suspensão com proporção de 10 g de solo para 25 mL de água. A suspensão foi agitada ocasionalmente durante o período de 2 horas. Para leitura das amostras foi utilizado um potenciômetro Mettler Toledo.

**pH em KCl** - Preparou-se uma amostra com proporção de 10g solo para 25 mL de solução de KCl 1M. A suspensão foi agitada ocasionalmente durante o período de 2 horas e a leitura do valor de pH foi efetuada em um potenciômetro Mettler Toledo.

**Matéria orgânica** - Para a avaliação do teor de matéria orgânica do solo foi seguido o procedimento de Walkley-Black. Este método consiste numa digestão úmida de uma amostra de solo com uma mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico durante 30 minutos. O dicromato residual é titulado com sulfato de ferro amoniacal 0,5M. Com este procedimento avalia-se o teor de carbono orgânico facilmente oxidável e o teor de matéria orgânica é estimado multiplicando a percentagem de carbono pelo fator 1,724, associado à suposição de que a matéria orgânica do solo contém cerca de 58% de carbono (REEUWIJK, 2002).

**Nitrogênio facilmente mineralizável** - Como indicador de nitrogênio facilmente mineralizável foi efetuada a extração de nitrogênio mineral com uma solução de KCl a quente e a frio. A uma toma de 10 g de solo foram adicionados 40 mL de KCl 2M. Os recipientes com a mistura solo/KCl foram colocados numa estufa a 100 °C durante 4 horas. Após arrefecer filtrou-se a suspensão, na qual se determinou a concentração dos íons  $\text{NH}_4^+$ . Em paralelo procedeu-se da mesma forma sem introduzir as amostras em estufa e após filtração procedeu-se à determinação da concentração de íons  $\text{NH}_4^+$  no extrato frio. O potencial de  $\text{NH}_4^+$  liberado por mineralização, ou a quantidade de nitrogênio amoniacal hidrolisável, encontrou-se pela diferença entre  $\text{NH}_4^+$  extraído a quente e extraído a frio (RODRIGUES, 2000). A concentração de íons  $\text{N-NH}_4^+$  determinou-se pelo método do fenato que tem como princípio a formação de um composto de cor azul, indofenol, pela reação da amónia, hipoclorito e fenol, catalisado pelo nitroprussido de sódio (CLESCERL *et al.*, 1998).

**Capacidade de troca catiônica** - Consiste na determinação do somatório dos cátions designados de bases de troca ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$ ) e da acidez de troca ( $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{H}^+$ ). Para a determinação das bases de troca, uma amostra de 2,5 g de solo foi percolada com 50 mL de uma solução de acetato de amônio tamponizada a pH 7 e os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  determinados no extrato filtrado por espectrofotometria de absorção atômica (JONES, 2001) num equipamento PYE Unicam PU 9100X. Para a determinação da acidez de troca uma amostra de 10 g de solo foi colocada em contato com uma solução de KCl 1 M (100 mL) e agitada durante 30 minutos. Depois de filtrada a suspensão, fez-se uma titulação com NaOH 0,1M, usando a fenoftaleína como indicador. (SIMS, 1996).

**Quantificação de fósforo e potássio** - O fósforo foi determinado pelo método Egner-Riehm, que consiste na adição de uma solução de lactato de amônio e ácido acético, tamponizada a pH 3,5, a uma porção de solo na proporção solo:solução de 1:20, agitando-se durante duas horas (MAP, 1977). Após filtração o fósforo foi determinado por espectrofotometria no comprimento de onda 882 nm num equipamento da marca Genesys, após desenvolvimento de cor pelo método do ácido ascórbico. Já o potássio foi quantificado por fotometria de chama (MAP, 1977) num fotômetro de chama Jenway.

**Quantificação de nitrogênio no solo** - o procedimento Kjeldahl para determinação do nitrogênio total envolve dois passos: Foi pesado 1g de solo para um tubo kjeldahl, adicionadas 2 pastilhas de catalisador (selênio) e 15,0 ml de ácido sulfúrico concentrado. O tubo com a mistura foi colocado numa placa de digestão de alumínio para conversão do nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal e determinação do nitrogênio amoniacal no digerido. O nitrogênio amoniacal é determinado pela coleta de  $\text{NH}_3^+$  libertado por destilação do digerido com uma base (NaOH) e análise do destilado por titulação com HCl 0,5 M (BREMNER, 1996).

**Quantificação de Boro** - A extração do boro no solo é feita pelo método de água quente, com determinação por colorimetria. A extração é feita por meio de bolsas seladas com 10 g de solo e solução de  $\text{CaCl}_2$  0,01 M. Posteriormente os extratos são filtrados e misturados com uma solução de azometina-H como agente de desenvolvimento de cor. A concentração avaliada em espectrofotômetro a 420 nm (KEREN, 1996).

**Pre-sidedress Soil Nitrate Test** - O teste de nitrato de solo pré-cobertura (PSNT) é um teste amplamente utilizado para aperfeiçoar o uso de fertilizantes nitrogenados para grão e silagem de milho. É um teste de solo que mede a quantidade de nitrogênio na forma de nitrato disponível no solo no momento em que a cultura mais o necessita.

O PSNT deve ser executado quando o milho está entre seis e 12 centímetros de altura. Este é o período de tempo em que o milho está se preparando para um surto de crescimento rápido e vai precisar de nitrogênio para alimentar esse crescimento. Se o PSNT mostrar que há nitrogênio suficiente no solo, pode ser benéfico renunciar à aplicação deste nutriente, economizando tempo e dinheiro. Se o teste mostrar que o nitrogênio é baixo, pode ser benéfico considerar um aumento da aplicação de nitrogênio para evitar qualquer comprometimento potencial no rendimento.

Para execução do teste foram retiradas amostras de solo na época já citada, na profundidade de 0-20 cm e posteriormente levadas ao laboratório. Depois de crivadas, foi pesada uma amostra de 10g à qual se adicionou 40 mL de KCl 2 M e a mistura foi agitada durante 30 minutos para extração do íon nitrato. Ao fim do tempo de agitação, a suspensão foi filtrada com papel Watman 42 e a concentração em nitratos foi efetada por espectrofotometria UV/VIS nos comprimentos de onda 220 e 275 nm. A leitura neste ultimo comprimento de onda tem como objetivo eliminar as interferências de compostos orgânicos dissolvidos no extrato (CLESCERL *et al.*, 1998).

#### 4.6.2 Análise dos nutrientes nos tecidos

**Quantificação de nitrogênio** - A quantificação do nitrogênio nos tecidos vegetais foi feita pelo procedimento Kjeldahl, já referido anteriormente (ponto 4.6.1.).

**Quantificação dos outros nutrientes** - Na determinação de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, manganês e zinco nos tecidos foi digerida uma amostra de 0,25 g de matéria seca com 10 mL de ácido nítrico em um digestor por micro-ondas MARS, CEM corporation. A determinação de fósforo na solução obtida foi efetuada por espectrofotometria a 882 nm. Os restantes nutrientes foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica.

**Quantificação de boro** - Pesou-se 1,0 g das amostras de folhas e plantas, que foram transferidas para cadinhos de porcelana onde se adicionou 0,10 g de óxido de cálcio que foi misturado de forma a obter uma amostra homogênea. A amostra sofreu incineração a 500 °C e as cinzas foram diluídas com 10 mL de ácido sulfúrico. O desenvolvimento de cor foi feito pelo método da azometina-H e a concentração determinada num espectrofotômetro a 420 nm (JONES, 2001).

**Stalk Nitrate Test** - O Stalk Nitrate Test é um teste de final de ciclo para avaliar a concentração de nitrogênio no caule, pois plantas de milho com deficiência em nitrogênio geralmente remobilizam o nitrogênio armazenado das porções inferiores do pedúnculo e das folhas para o grão em desenvolvimento, resultando em menores concentrações de nitrogênio no caule no final da estação. Já plantas que consomem quantidades excessivas de nitrogênio no solo armazenam quantidades excessivas nas seções mais baixas do caule, até o final da estação de crescimento, resultando assim em maiores concentrações de nitrogênio no caule.

As amostras de caule em campo devem ser coletadas uma a três semanas depois que 80% dos grãos atinjam o estágio fenológico camada preta, ou seja, quando as células na ponta do grão perdem a sua integridade e rompem causando a formação de uma camada preta (BLACKMER e MALLARINO, 1996).

Em laboratório foi pesado 1 g de material do caule moído e adicionados 50 mL de água destilada. Agitou-se a suspensão durante 30 minutos e ao fim deste tempo foi filtrada. A concentração em nitratos foi determinada num espectrofotômetro na gama ultravioleta.

#### 4.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Pelo método convencional ou das diferenças determina-se, segundo Wild (1988), a fração de nitrogênio aparentemente recuperado da seguinte forma:

$$\frac{N_x - N_0}{F_x} \times 100$$

em que,  $N_x$  e  $N_0$  representam o nitrogênio total nas plantas que, respectivamente, receberam e não receberam fertilizante, e  $F_x$  a quantidade de fertilizante aplicado.<sup>3</sup>

As análises estatísticas dos resultados foram efetuadas no programa estatístico JPM 7. Os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) pelo

teste F e ocorrendo significância as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As tabelas e gráficos foram elaborados no programa Excel.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 AVALIAÇÃO DO NITROGÊNIO MINERAL NO SOLO ANTES DA ADUBAÇÃO DE COBERTURA

A figura 9 apresenta os valores dos teores de nitratos no solo antes da aplicação da adubação nitrogenada de cobertura. Registou-se um aumento significativo do teor de nitratos no solo à medida que aumentaram as doses de nitrogênio do fertilizante convencional (NA) e também do fertilizante estabilizado (FE) com inibidor da nitrificação.

O nitrato é um elemento muito móvel e permanece no solo até ser absorvido pelas plantas, lixiviado ou desnitrificado. Com altas precipitações a lixiviação ocorre facilmente, pela percolação dos nitratos para as camadas mais profundas, sendo perdidos e não estando mais disponíveis para as plantas. A desnitrificação ocorre quando bactérias desnitrificantes transformam o nitrato em formas gasosas de nitrogênio.

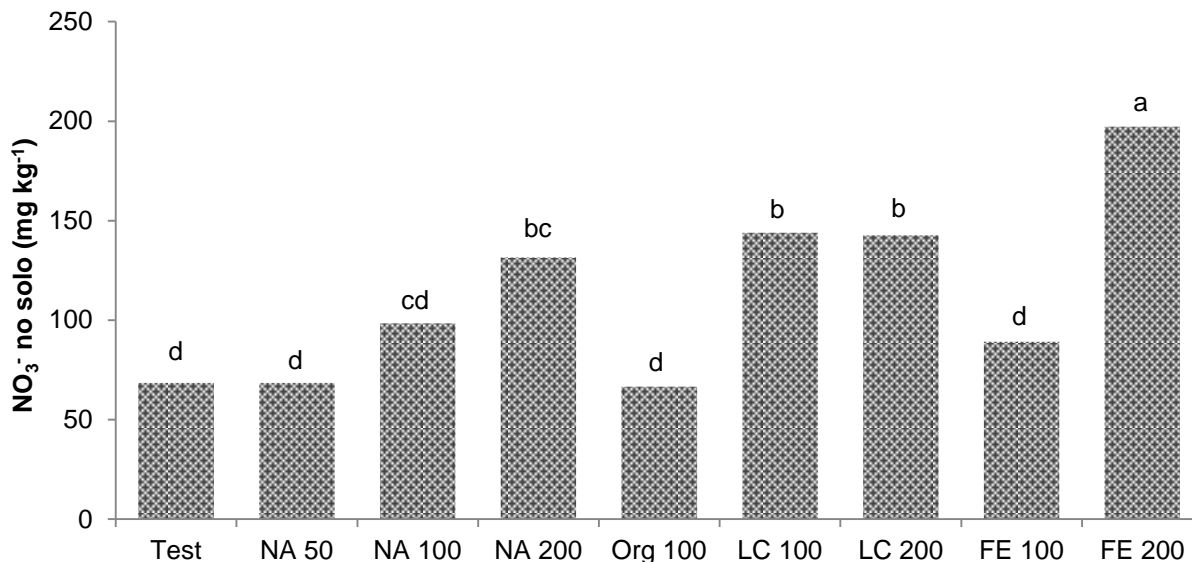


Figura 9 – Teor de nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) no solo antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Do tratamento NA 50 para o NA 200 houve uma diferença de 63 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup> kg<sup>-1</sup>, o que mostra o efeito das doses de nitrato de amônio aplicado no teor de nitratos no solo. As modalidades Test, NA 50, Org 100 e FE 100 não tiveram diferenças significativas, mas a modalidade FE 200 apresentou valores muito altos em relação

às outras modalidades. Com a aplicação de corretivo orgânico os valores foram baixos, justificado pelo fato do nitrogênio orgânico sofrer um processo de mineralização lenta, não estando disponível no solo na forma de nitratos, esperando a ação dos microrganismos do solo para o liberarem, mostrando assim um valor abaixo da modalidade NA100 que corresponde à mesma dose de nitrogênio aplicada na forma mineral.

Nos tratamentos LC 100 e LC 200 não houve diferença significativa no teor de nitratos no solo nessa fase inicial. Para o fertilizante estabilizado houve uma tendência de maior quantidade de nitratos com a maior aplicação da dose do fertilizante.

No teor de amônio presente no solo nesta data (figura 10) podemos notar que não houve diferença significativa entre a maioria dos tratamentos. A hidrólise da ureia e a posterior nitrificação das formas amoniacais foram processos suficientes rápidos, transferindo a maior parte da nutrição nitrogenada das plantas para a forma nítrica.

Apenas se destaca o valor do tratamento FE 200, sendo significativamente mais elevado que os restantes, o qual pode ser motivado pelo fertilizante utilizado conter uma molécula inibidora da nitrificação. Podemos notar que esse fertilizante estabilizado com inibidor de nitrificação se mostrou muito eficiente nessa etapa, onde manteve o  $\text{NH}_4^+$  no solo por maior tempo, limitando as perdas de  $\text{N}_2\text{O}$  durante a nitrificação e aumentando posteriormente a quantidade de nitrogênio mineral no solo e nas plantas. Esses resultados coincidem com Vale (2009) que observou aumento no teor de amônio no solo à medida que aumentava a dose de ureia.

Para o fertilizante convencional, nitrato de amônio, que tem em sua composição 50% de  $\text{NH}_4^+$  e 50% de  $\text{NO}_3^-$ , pode-se notar que a taxa de nitrificação do  $\text{NH}_4^+$  foi bastante elevada, onde na pré-cobertura grande parte do amônio já tinha sido nitrificado.

Quando avaliados os teores de nitrato e amônio juntos pode-se perceber que com a aplicação dos fertilizantes o nitrogênio em suas formas minerais não foi ainda totalmente absorvido pelas plantas, permanecendo grande parte no solo para fazer face às necessidades futuras da planta. Por outro lado, em solos bem arejados, com boas propriedades químicas, físicas e biológicas, o  $\text{NH}_4^+$  converte-se em  $\text{NO}_3^-$  rapidamente, sendo os teores de nitratos substancialmente mais elevados que os teores de amônia. O único tratamento com valores relativamente elevados de

amônia no solo foi FE 200, por o mecanismo inibidor de nitrificação ter dificultado a transformação do  $\text{NH}_4^+$  a  $\text{NO}_3^-$ .

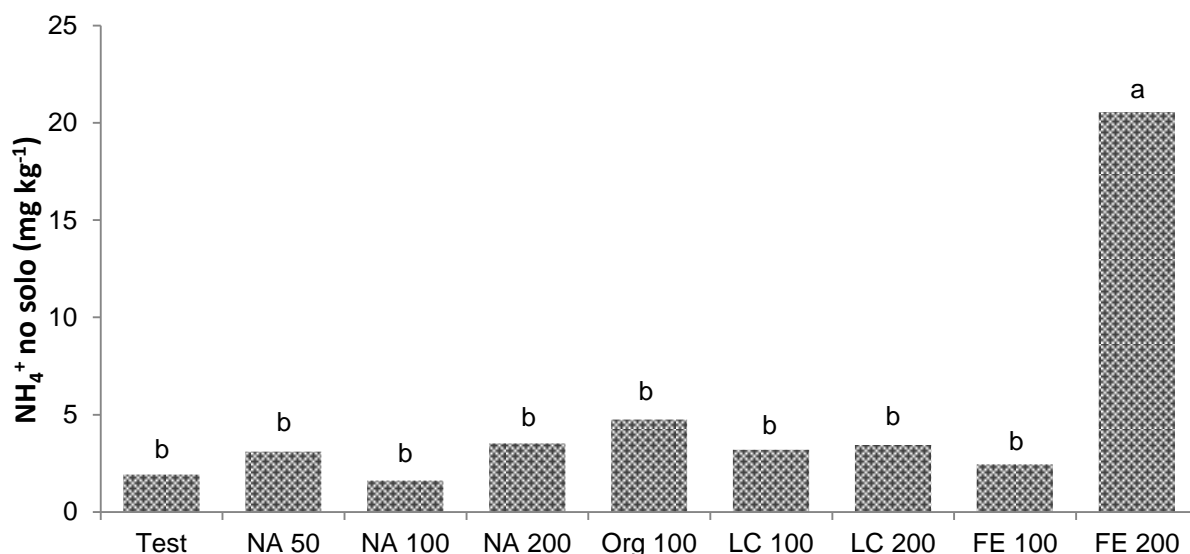


Figura 10 – Teor de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) no solo antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Os resultados obtidos evidenciam que a análise do nitrogênio mineral no solo em pré-cobertura é um parâmetro importante como indicador da disponibilidade do nitrogênio no solo e ajuda a tomar decisões sobre a futura aplicação de fertilizante, tendo o indicador sido usado com sucesso por diversos investigadores (RAMBO *et al.*, 2007).

## 5.2 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA DURANTE A ESTAÇÃO DE CRESCIMENTO

### 5.2.1 Teor de clorofila - SPAD

A figura 11 apresenta os valores das leituras do aparelho SPAD 502 nas folhas do milho, que indicam a intensidade do verde das plantas, ou seja, fornecem uma estimativa do teor de clorofila. Esse valor pode dar indicação instantânea do estado nutricional em nitrogênio, sendo que quando há deficiência de nitrogênio na planta as folhas ficam com um verde menos intenso ou amareladas e quando está em excesso, as folhas ficam com coloração verde-escuro ou mais intensa.

Registou-se uma tendência crescente no teor de clorofila com o aumento da dose de nitrogênio, entre Test e NA 200. Quanto maior a quantidade de nitrogênio

aplicado mais elevado o teor de nitrogênio na folha e o teor de clorofila. Conseqüentemente, uma folha mais verde apresenta um valor de SPAD mais elevado. A modalidade Org 100 se manteve abaixo do tratamento com aplicação de 100 kg N ha<sup>-1</sup> na forma mineral.

As leituras variaram de 54,60 na modalidade testemunha e 62,77 na modalidade NA 200. O valor mais baixo verificou-se na testemunha, em consequência da menor absorção de nitrogênio na fase inicial de crescimento da planta, fase na qual foi avaliado o teor de clorofila. Já o valor mais alto verificou-se no tratamento NA 200 pela grande disponibilidade de nitrogênio imediata para a cultura. Costa (1991) registrou aumentos significativos nos teores de clorofila com o aumento das doses de nitrogênio na cultura do milho, que comprova a resposta do teor de clorofila nas folhas ao aumento da disponibilidade de nitrogênio no solo.

O teor de clorofila tem correlação com o rendimento da cultura, onde as modalidades com alta quantidade de fertilizantes apresentaram altos teores de clorofila e alta produtividade. Corroborando com França *et al.*, (2011), que consideram que a leitura SPAD é um indicador satisfatório do suprimento de nitrogênio para a cultura do milho, influenciando diretamente no rendimento.

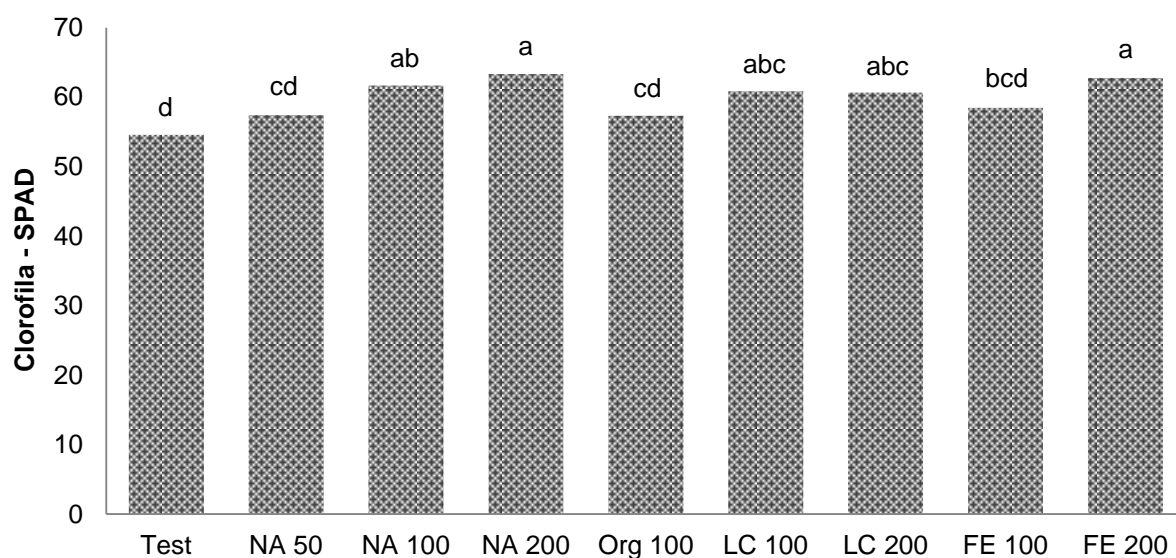


Figura 11 – Valores da leitura do SPAD antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ )

A redução do teor de clorofila pode indicar um déficit de nitrogênio nas plantas que, como consequência, pode ter uma redução na taxa fotossintética (MEHOUACHU e LEMEUR, 1993). Considerando este parâmetro, pode-se perceber

que as altas doses de fertilizante à base de nitrato de amônio, bem como os fertilizantes de liberação gradual, tiveram um efeito positivo em relação à testemunha e demais modalidades constituídas por menores doses de nitrogênio. Apesar das clorofilas serem apresentadas como estruturas prioritárias para o nitrogênio, os seus níveis na planta também dependem do nitrogênio disponível no solo (GREGORY *et al.*, 1981).

### 5.2.2 Índice de vegetação - NDVI

Na figura 12 encontram-se os valores do índice NDVI em função dos diferentes tratamentos e doses de nitrogênio na cultura do milho. Os valores de NDVI variam de 0,82 até 0,85, não mostrando diferença significativa entre as modalidades. Esse fato pode ser justificado pela pouca sensibilidade do NDVI ao estado nutricional da planta, onde somente irá ter valores significativos quando houver uma diferença muito clara entre as propriedades óticas da planta (AFONSO *et al.*, 2018). Contudo, em vários trabalhos na cultura do milho foi encontrada relação significativa do índice de vegetação com as doses de nitrogênio e produtividade (BORGUI *et al.*, 2016).

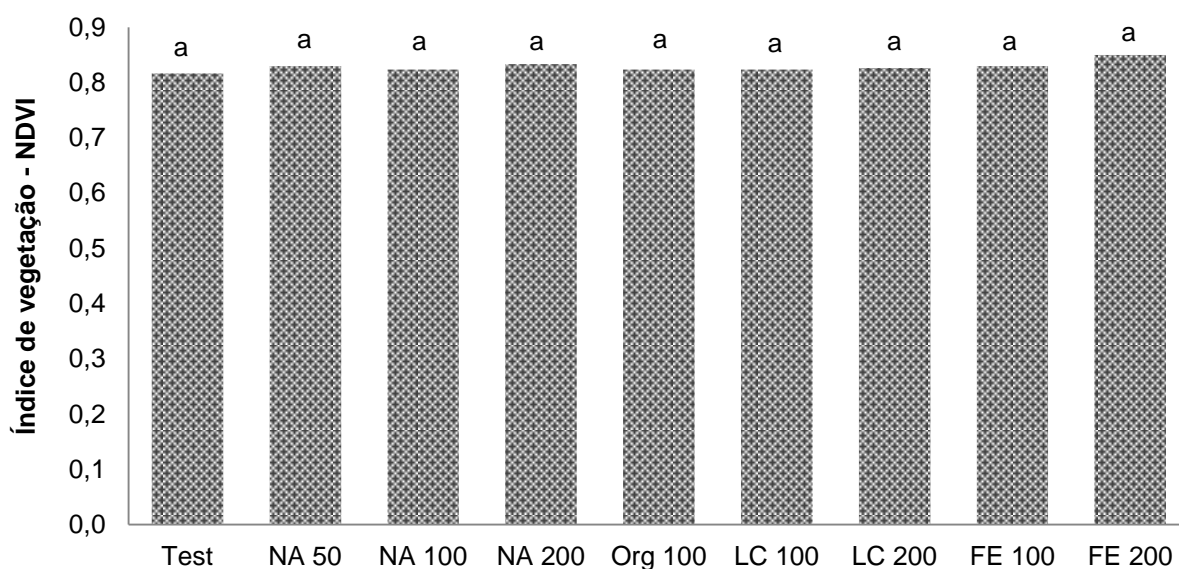


Figura 12 – Valores do índice de vegetação NDVI antes da adubação de cobertura (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ )

### 5.2.3 Teor de nutriente nas folhas

Considerando os valores da figura 13, pode-se ver que a concentração em nitrogênio nas folhas variou de 24,57 g kg<sup>-1</sup> na modalidade NA 100 a 29,03 g kg<sup>-1</sup> na modalidade FE 200, a que continha o inibidor da nitrificação. De acordo com os níveis adequados de concentração de nitrogênio na folha (20-28 g kg<sup>-1</sup>), todos os tratamentos apresentaram valores apropriados de nitrogênio, por isso não foi clara a influência da fertilização nitrogenada. Assim, o teor de nitrogênio nas folhas na modalidade testemunha registou valores tão altos como nas outras modalidades. Sendo assim não houve diferenças significativas entre doses. O tratamento Org 100 apresentou também valores de nitrogênio nas folhas equivalentes aos restantes tratamentos. Segundo Rambo (2004) a concentração de nitrogênio na folha pode indicar o nível do nutriente na planta, partindo do princípio que as folhas são os órgãos da planta que melhor refletem o estado nutricional da mesma, respondendo mais rapidamente às variações no suprimento de nutrientes do solo e dos fertilizantes.

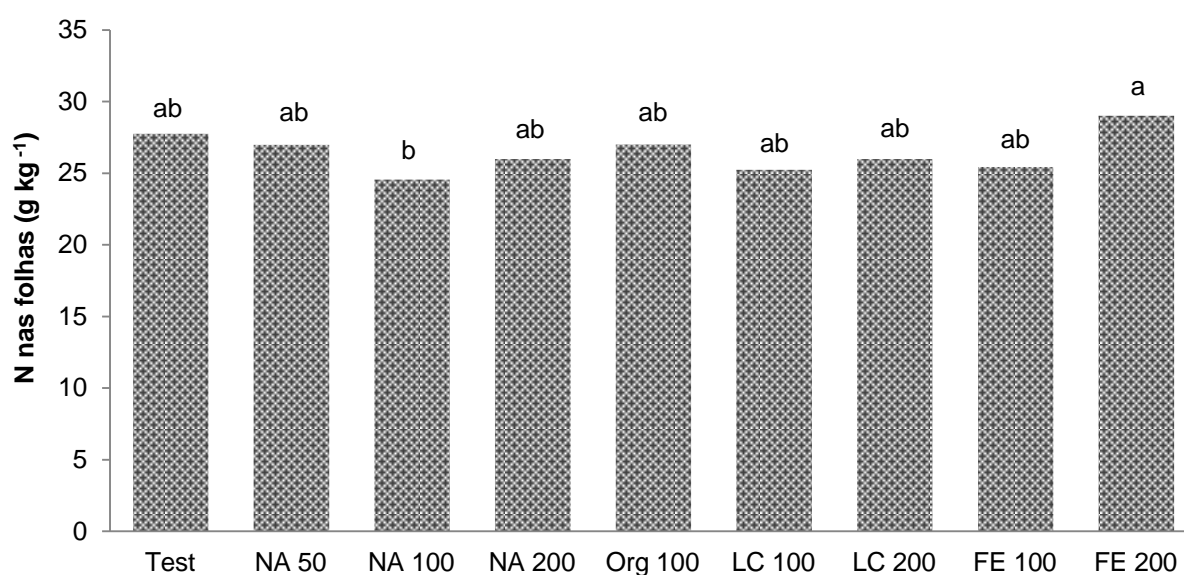


Figure 13 – Concentração de nitrogênio (N) nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

O fertilizante estabilizado, aplicado na dose de 200 kg N ha<sup>-1</sup>, apresentou os valores de nitrogênio nas folhas mais elevados, talvez em resultado de uma nutrição com maior proporção de amônia que tende a aumentar de forma mais rápida o teor de nitrogênio nas folhas devido aos menores custos energéticos de assimilação. O

acréscimo do nitrogênio nas folhas devido a maior disponibilidade de nitrogênio no solo foi também verificado por Gupta e Saxena (1976).

Para as plantas que foram submetidas a maior concentração de  $\text{NH}_4^+$ , houve uma indução da intensidade do verde e conseqüentemente uma maior acumulação de nitrogênio. O que se destacou foi o FE 200 pelo verdor mais intenso por sua nutrição estar suportada mais em  $\text{NH}_4^+$  do que em  $\text{NO}_3^-$ . O baixo valor da modalidade NA 100 pode ser justificado por variabilidade experimental, onde as plantas nunca estão submetidas às mesmas condições.

Os valores obtidos para aplicação de fertilizante foram confirmados com o estudo de Valderrama *et al.* (2011), que concluíram que o incremento das doses de fertilizantes revestidos por polímeros aumenta, linearmente, o teor de nitrogênio foliar.

A tabela 3 apresenta os valores da concentração de P, K, Ca e Mg das folhas do milho. Em rigor não houve diferença entre os tratamentos fertilizantes para a concentração de fósforo nas folhas. Todos os tratamentos, inclusive a testemunha, apresentaram concentrações de fósforo nas folhas dentro dos valores normais de referência (1,1 - 3,0 g  $\text{kg}^{-1}$ ). O fato de o tratamento testemunha apresentar concentrações de fósforo adequadas pode ser explicado com elevados teores de fósforo encontrados no solo no início do experimento.

Em relação à concentração de potássio nas folhas houve diferença significativa entre os tratamentos fertilizantes. Os tratamentos NA 50 e Org 100 se mostraram mais eficientes em relação aos outros fertilizantes. Entretanto, em todos os tratamentos, incluindo a testemunha, as concentrações foliares de potássio encontraram-se próximos do limite inferior do intervalo de suficiência para o milho de 17 g  $\text{kg}^{-1}$ .

Para as concentrações foliares de cálcio, houve diferença significativa entre tratamentos. A modalidade LC 200 apresentou o valor mais baixo de cálcio com 4,57 g  $\text{kg}^{-1}$ , e o valor mais elevado foi registado em NA 100 com 5,78 g  $\text{kg}^{-1}$ . O Org 100 se manteve na média dos tratamentos, sendo que o valor de Ca no corretivo orgânico não era alto. O único fertilizante que contém algum cálcio em sua composição é o LC, mas que por ser em concentração muito baixa não mostrou efeito significativo nas folhas.

Tabela 3 - Concentração de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio) e Mg (magnésio) nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Concentração de P, K, Ca e Mg nas folhas								
Tratamento	P		K		Ca		Mg	
	g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>	
Test	1,87	a	16,05	b	5,44	ab	6,13	ab
NA 50	2,09	a	22,90	a	5,44	ab	5,01	cd
NA 100	2,13	a	14,31	b	5,78	a	7,01	a
NA 200	2,07	a	17,18	b	5,53	ab	5,36	bc
Org 100	1,61	a	21,53	a	5,04	abc	4,11	d
LC 100	1,83	a	13,58	b	5,55	ab	5,25	bc
LC 200	1,57	a	16,73	b	4,57	c	4,98	cd
FE 100	1,77	a	15,35	b	4,82	bc	5,60	bc
FE 200	1,70	a	14,46	b	5,11	abc	5,19	bcd

Em relação à concentração foliar de magnésio, houve diferença significativa entre os tratamentos, sendo que o tratamento com maior concentração foi o NA 100 com 7,01 g kg<sup>-1</sup> e o menos eficiente o Org 100 com 4,11 g kg<sup>-1</sup>. Entretanto, todos os tratamentos apresentaram concentrações superiores ao intervalo adequado de suficiência.

O elevado teor de Mg no NA 100 pode ser justificado por um complexo de troca bem provido de nutrientes não tendo problemas com nutrição de magnésio (LOPES, 2014).

Na tabela 4 podem observar-se as concentrações foliares médias dos micronutrientes boro, cobre, ferro, zinco e manganês. Todos os micronutrientes apresentaram diferença significativa em pelo menos um dos tratamentos.

As concentrações foliares de boro variam entre 11,03 a 21,59 mg kg<sup>-1</sup>, sendo o intervalo de suficiência entre 4 a 25 mg kg<sup>-1</sup>. As concentrações foliares de ferro variam de 85,19 a 136,42 mg kg<sup>-1</sup>. Em relação ao manganês as concentrações foliares variam de 35,02 a 64,05 mg kg<sup>-1</sup>. Para o zinco e cobre, o tratamento com maior concentração do elemento foi o LC 100 com 68,97 e 19,94 mg kg<sup>-1</sup> respectivamente.

Tabela 4 - Concentração dos micronutrientes nas folhas expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Tratamento	Micronutrientes									
	B		Fe		Mn		Zn		Cu	
	mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	
<b>Test</b>	12,41	b	85,19	b	57,17	ab	42,77	b	17,33	bc
<b>NA 50</b>	15,32	b	86,00	b	50,29	bc	47,57	b	17,23	bc
<b>NA 100</b>	11,36	b	136,42	a	42,42	cd	47,88	b	18,78	ab
<b>NA 200</b>	13,57	b	98,27	ab	54,37	ab	43,13	b	18,64	ab
<b>Org 100</b>	21,59	a	89,99	b	35,02	d	45,7	b	15,55	c
<b>LC 100</b>	11,03	b	110,34	ab	51,21	bc	68,97	a	19,94	a
<b>LC 200</b>	16,09	b	97,21	ab	60,04	ab	48,97	b	18,09	abc
<b>FE 100</b>	13,18	b	97,17	ab	50,28	bc	50,62	b	18,92	ab
<b>FE 200</b>	12,38	b	104,24	ab	64,05	a	44,06	b	18,66	ab

Apesar de o boro ser classificado como micronutriente a frequência da sua aplicação tem de ser considerada em Trás-os-Montes, tendo uma importância equivalente à dos macronutrientes principais (ARROBAS e MOUTINHO-PEREIRA, 2009). O tratamento Org 100 revelou-se como uma fonte importante de boro, sendo que a concentração de boro na composição do corretivo orgânico é alta como apresenta a tabela 2. O fertilizante de liberação controlada apresenta na sua composição teores de boro e zinco, mas não houve diferença significativa em relação aos outros tratamentos.

Embora tenham ocorrido diferenças significativas, as mesmas apresentam pouca relevância, ao ponto de vista que todas as médias das concentrações foliares se encontraram dentro ou acima do intervalo de suficiência.

### 5.3 PRODUTIVIDADE E EFICIÊNCIA DO USO DE NITROGÊNIO

#### 5.3.1 Produtividade

A figura 14 apresenta os valores de produtividade para a cultura do milho. É possível identificar efeito significativo dos tratamentos fertilizantes relativamente aos valores médios obtidos de produção.

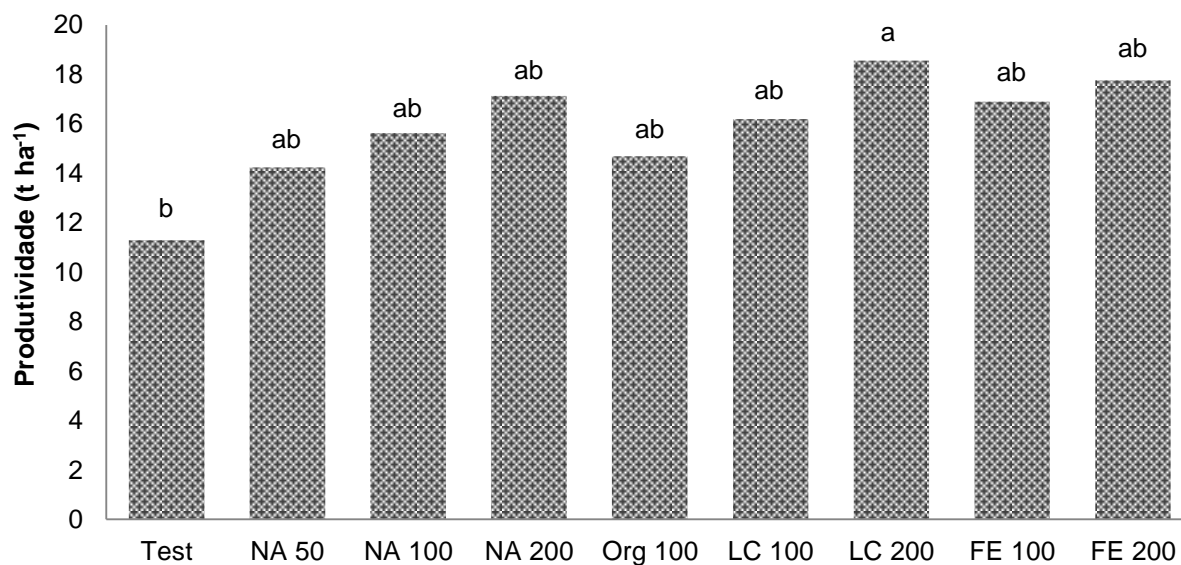


Figura 14 – Produtividade da cultura do milho em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A modalidade Test apresentou uma produtividade de forragem de 11.288 kg MS ha<sup>-1</sup>, que, como esperado, corresponde ao menor valor. A modalidade que apresentou maior produtividade foi a LC 200 com 18.554 kg MS ha<sup>-1</sup>, comprovando a eficiência do fertilizante de liberação controlada. O Org 100 apresentou uma produção de 14.692 kg MS ha<sup>-1</sup>. O corretivo orgânico não mostrou qualquer efeito positivo significativo em relação aos fertilizantes convencionais e de liberação gradual para a produtividade. Dos fertilizantes de liberação gradual o que apresentou melhor desempenho em produtividade foi o de liberação controlada com 200 kg N ha<sup>-1</sup>, embora sem diferença significativa para qualquer das modalidades fertilizadas.

Nota-se uma tendência crescente linear do tratamento Test até o NA 200, ou seja, quando aumenta a dose de fertilizante ocorre um aumento do valor médio de produtividade.

Portanto, na avaliação da produtividade da cultura, todos os fertilizantes se destacaram da testemunha sem fertilização. Os fertilizantes de liberação gradual se mostraram mais eficientes em relação às mesmas doses do fertilizante convencional. Corroborando com Fontoura e Bayer (2010), que mesmo não encontrando diferenças significativas na produtividade de milho utilizando fertilizantes com ureia, estabilizados e de liberação controlada, encontraram uma a

resposta de produtividade com aplicação de fertilizantes estabilizados e de liberação controlada de até 29 % de produtividade em relação à testemunha sem nitrogênio.

### 5.3.2 Macronutrientes na planta na colheita

A Figura 15 mostra a concentração média de nitrogênio presente na planta na colheita. Os valores obtidos apresentam diferença significativa entre os tratamentos, mas todos os valores de nitrogênio encontram-se dentro do limite de suficiência.

O tratamento que mais se destacou foi o FE 200 com  $14,24 \text{ g kg}^{-1}$  em oposição a NA 100, que apresentou o menor resultado, com  $9,83 \text{ g kg}^{-1}$ . Esse valor baixo de NA 100 é difícil de explicar devendo ser atribuído a variabilidade experimental. Mesmo assim, todos os tratamentos estão dentro da concentração suficiente de Westerman (1990), que varia de 10 a  $25 \text{ g kg}^{-1}$ .

O tratamento Org 100 apresentou um teor de nitrogênio de  $11,84 \text{ g kg}^{-1}$ , o qual se manteve na média dos outros tratamentos com aplicação de 100 kg de nitrogênio na forma mineral.

Tal como já foi observado com o teor de nitratos, não foi possível realizar melhorias significativas no estado nutritivo das plantas fertilizadas com o corretivo orgânico nas fases finais do ciclo. Contudo, o valor do Org 100 ficou próximo a modalidade testemunha.

Correlacionando os valores dos teores de nitrogênio na folha (figura 13) e na planta na colheita pode-se constatar que ao longo da estação de crescimento o teor de nitrogênio decresceu. Este resultado demonstra que, nas folhas, existe uma fração que se comporta como reserva, que vai sendo utilizada a medida que a disponibilidade de nitrogênio no solo diminui. Demonstra também um efeito de diluição, associado ao aumento da biomassa da planta e a translocação de fotoassimilados para o grão após a floração.

Em experimento semelhante Vasconcelos *et al.*, (2010) não encontraram diferenças significativas comparando fertilizante nitrogenado convencional e duas fontes de fertilizantes revestidas com polímeros em relação ao teor de nitrogênio foliar na cultura do milho conduzido em casa de vegetação.

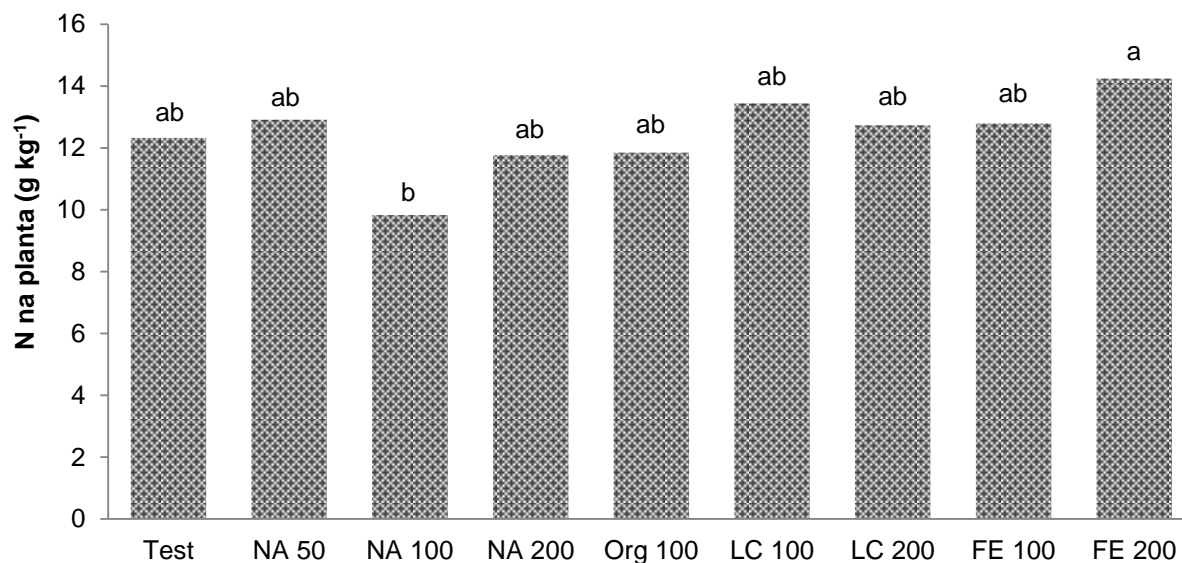


Figura 15 – Concentração de nitrogênio (N) na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

A tabela 5 apresenta os valores da concentração de P, K, Ca e Mg na planta na colheita. Os teores de fósforo na planta não diferiram significativamente entre tratamentos, tal como se tinha registado para a concentração de fósforo nas folhas (tabela 3). Os valores médios mais elevados foram, contudo, obtidos no tratamento FE 200 (1,41 g kg<sup>-1</sup>) e uma menor concentração média no tratamento NA 200 (0,91 g kg<sup>-1</sup>). O fato de todos os tratamentos apresentarem concentrações de fósforo foliar adequados pode ser explicado pela fertilização de fósforo de base aplicada em todas as modalidades, uma vez que o fósforo não foi fator em estudo.

Segundo Westerman (1990), os valores adequados de fósforo para o milho são de 2 a 6 g kg<sup>-1</sup>. Isto torna o fósforo o macronutriente em menor concentração na matéria seca, sendo situação normal para maioria das plantas (BRYSON *et al.*, 2014).

O fósforo é um elemento pouco móvel no solo uma vez que sofre reações que resultam normalmente na redução da sua disponibilidade para as plantas (HAVLIN *et al.*, 2005), o que também contribui para a estabilidade da sua concentração nos tecidos.

A concentração de potássio na planta se mostrou muito desigual aos resultados das folhas, os quais não apresentaram diferenças significativas. A modalidade Org 100 apresentou um valor elevado, de 15,70 g kg<sup>-1</sup>. A modalidade

que apresentou menor valor de potássio na planta foi o NA 100, com 7,47 g kg<sup>-1</sup>. O tratamento Test apresentou um valor de 7,76 g kg<sup>-1</sup>, ficando próximo ao NA 100.

O elevado valor da concentração de potássio no tratamento Org 100 pode ser sustentado pela razão do corretivo orgânico apresentar uma alta quantidade de potássio em sua composição inicial. Contudo, também este resultado deve ser justificado por variabilidade experimental.

Tabela 5 - Concentração de P (fósforo), K (potássio), Ca (cálcio) e Mg (magnésio) na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Concentração de P, K, Ca e Mg na planta								
Tratamento	P		K		Ca		Mg	
	g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>		g kg <sup>-1</sup>	
<b>Test</b>	1,19	a	7,76	c	3,69	a	4,99	a
<b>NA 50</b>	1,17	a	14,08	ab	2,99	a	2,98	a
<b>NA 100</b>	1,12	a	7,47	c	3,27	a	4,69	a
<b>NA 200</b>	0,91	a	10,73	abc	3,08	a	3,80	a
<b>Org 100</b>	1,13	a	15,70	a	3,65	a	3,09	a
<b>LC 100</b>	1,20	a	8,20	c	3,88	a	4,77	a
<b>LC 200</b>	1,09	a	8,23	c	3,09	a	4,73	a
<b>FE 100</b>	0,97	a	9,10	bc	3,51	a	3,93	a
<b>FE 200</b>	1,41	a	11,63	abc	3,55	a	4,02	a

No que diz respeito à concentração em cálcio, não se registraram diferenças significativas entre tratamentos. Para o cálcio a concentração nos tecidos variou de 2,99 g kg<sup>-1</sup> para NA 50, e 3,88 g kg<sup>-1</sup> para LC 100, tratamento que apresentou maior concentração. No geral, as maiores concentrações registraram-se nos tratamentos com adição de fertilizantes nitrogenados, principalmente nas concentrações de 100 kg ha<sup>-1</sup>. Diferente do esperado os valores elevados de cálcio no solo não foram passados para a planta.

Para o magnésio, o menor valor registrou-se no NA 50 com 2,98 g kg<sup>-1</sup>, sendo um valor mais baixo que a concentração encontrada na modalidade Test (onde se registou a concentração mais elevada de 4,99 g kg<sup>-1</sup>).

Plantas cultivadas em solo com um pH próximo da neutralidade e um complexo de troca bem provido de nutrientes não terão problemas com nutrição de magnésio (LOPES, 2014).

Os valores apresentados para Ca e Mg estão acima do intervalo esperado da concentração de nutrientes, segundo Westerman (1990), para cálcio deve estar entre 0,1 e 0,2 g kg<sup>-1</sup> e para o magnésio entre 0,9 e 2,0 g kg<sup>-1</sup>.

### 5.3.3 Micronutrientes na planta

A tabela 6 apresenta a concentração média de boro, cobre, zinco, manganês e ferro na planta do milho. Não houve diferença significativa para boro, ferro e zinco. Para os outros tratamentos os valores se mantiveram muito próximos, embora as médias tenham tido significado estatístico.

Para o boro o maior valor foi de 13,77 mg kg<sup>-1</sup> em Org 100 e o menor 9,23 mg kg<sup>-1</sup> em NA 100. Os valores adequados segundo Westerman (1990) são de 1 a 10 mg kg<sup>-1</sup>, onde os valores apresentados se mostraram mais elevados aos suficientes. Os valores de ferro na planta se mostram elevados, sendo que segundo Westerman (1990) o adequado seria de 30 a 50 mg kg<sup>-1</sup>. Para o cobre os valores também se mostraram elevados, com valores superiores a 9,94 mg kg<sup>-1</sup>, sendo que o mesmo autor cita como adequadas concentrações de 1 a 5 mg kg<sup>-1</sup>.

A modalidade Org 100 mostrou valores médios elevados de boro nos tecidos em relação às outras modalidades, embora sem diferenças significativas, talvez pelo fato do corretivo orgânico apresentar elevada concentração de boro na sua composição. Pelo contrário, teve valores baixos para manganês e cobre, os quais estavam em baixa concentração no fertilizante inicial, como mostra a tabela 2.

Tabela 6 – Concentração dos micronutrientes na planta expressa em matéria seca (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Tratamento	Micronutrientes									
	B		Fe		Mn		Zn		Cu	
	mg kg <sup>-1</sup>		mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	mg kg <sup>-1</sup>	
Test	10,30	a	98,67	a	34,89	ab	30,28	a	11,96	ab
NA 50	10,45	a	90,90	a	24,74	b	26,15	a	10,74	bc
NA 100	9,23	a	69,37	a	30,53	ab	24,62	a	11,48	abc
NA 200	10,00	a	66,41	a	34,50	ab	22,98	a	11,00	abc
Org 100	13,77	a	62,02	a	26,26	b	28,56	a	9,94	c
LC 100	10,68	a	101,54	a	30,43	ab	31,90	a	12,55	a
LC 200	11,15	a	104,58	a	31,64	ab	30,15	a	11,59	abc
FE 100	11,92	a	90,35	a	33,90	ab	27,65	a	11,52	abc
FE 200	13,41	a	87,09	a	39,54	a	32,56	a	11,96	ab

A determinação da concentração dos nutrientes (fósforo, potássio, cálcio, magnésio, boro, cobre, ferro, manganês e zinco) nas folhas e na planta inteira não revelou tendências claras do efeito do nitrogênio, não ocorrendo de uma maneira geral diferenças significativas entre tratamentos. Esses nutrientes foram aplicados em quantidade equivalente e provavelmente as doses de nitrogênio utilizadas não originaram desequilíbrios nutricionais que interferissem de forma significativa com a concentração dos outros nutrientes nos tecidos.

#### 5.3.4 Nitratos nos caules na colheita

O acúmulo de nitrogênio nos caules pode ser consequência do excesso de adubação, sendo assim o teste de nitratos nos caules pode ser útil para diminuir futuras aplicações. A utilização de partes do caule são comuns em culturas que não tem pecíolos, como o milho, pois é avaliado a fração solúvel do nutriente (SIMS *et al.*, 1995). Os nitratos são uma fração não metabolizada de nitrogênio normalmente utilizada como indicador do estado nutritivo nitrogenado. Quando as necessidades básicas das plantas estão satisfeitas, acumulam-se como forma de reserva e são avaliadas na forma de nitrato nos caules ao final do ciclo da cultura (RODRIGUES, 2000).

Os resultados das concentrações de nitratos nos caules são apresentados na figura 16. A concentração de nitrogênio nos caules variou de forma significativa com a dose de nitrogênio aplicada.

O tratamento que apresentou maior valor de nitratos no caule foi o LC 200 com  $9.633 \text{ mg kg}^{-1}$  em oposição do tratamento Org 100 que apresentou o menor valor com  $333 \text{ mg kg}^{-1}$ .

Pesquisas anteriores concluíram que concentrações de  $\text{NO}_3^-$  inferiores a  $450 \text{ mg kg}^{-1}$  são classificadas como baixas e o rendimento pode ser limitado, entre  $450$  e  $2.000 \text{ mg kg}^{-1}$  foram associadas com disponibilidade ótima de nitrogênio e o rendimento não afetado, enquanto concentrações superiores a  $2.000 \text{ mg kg}^{-1}$  indicaram que a disponibilidade de nitrogênio foi excessiva (BROUDER, 2003).

Com essa classificação podemos notar que o tratamento Org 100 ( $333 \text{ mg kg}^{-1}$ ) ficou classificado com baixo. Os tratamentos Test ( $666 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e NA 50 ( $816 \text{ mg kg}^{-1}$ ) foram considerados como suficientes, tendo uma ótima disponibilidade de nitrogênio. Já os tratamentos NA 100 ( $4.350 \text{ mg kg}^{-1}$ ), NA 200 ( $8.616 \text{ mg kg}^{-1}$ ), LC

100 (5.966 mg kg<sup>-1</sup>), LC 200 (9.633 mg kg<sup>-1</sup>), FE 100 (6.916 mg kg<sup>-1</sup>) e FE 200 (3.800 mg kg<sup>-1</sup>) foram classificados como uma adubação excessiva.

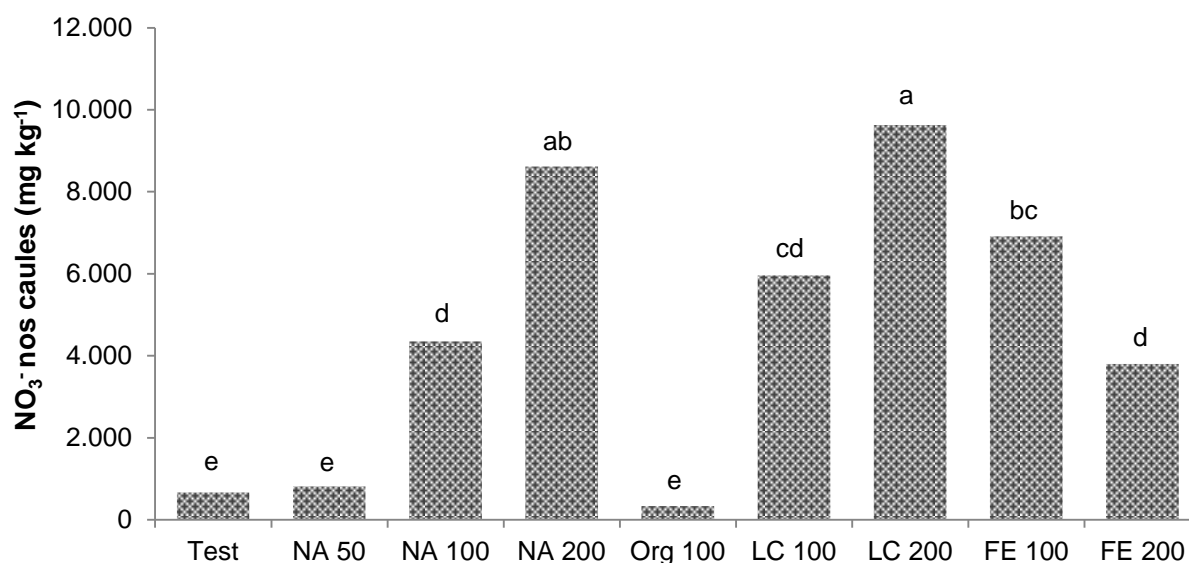


Figura 16 – Concentração de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> nos caules na colheita (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Em relação aos teores de nitrogênio aplicado, pode-se notar um acréscimo nos teores de nitratos nos caules conforme o aumento das doses nitrogênio aplicado. O fertilizante com inibidor da nitrificação não permitiu que houvesse nitratos livres no solo, logo não ficaram disponíveis para serem absorvidos e acumulados na planta.

Quanto maior o teor de nitratos nos caules maior foi a absorção de nitratos pela planta, sem terem sido assimilados e usados na produção de biomassa. Contudo, algumas modalidades terão feito persistir o nitrogênio amoniacal mais tempo no solo, fazendo com que a planta tenha absorvido uma maior quantidade de amônio e menor de nitratos, como mostrou o teste de nitratos no solo antes da aplicação de cobertura (figura 9).

Se as concentrações de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no caule do milho de fim de estação forem consistentemente menores que 250 mg kg<sup>-1</sup> ou maiores de 2.000 mg kg<sup>-1</sup>, poder-se considerar a realização de outros testes de nitrogênio para identificar taxa de nitrogênio ideal, em vez de confiar apenas no teste de nitratos no caule para alterar a atual gestão de nitrogênio (NIELSEN e CAMBERATO, 2011).

### 5.3.5 Nitrogênio aparentemente recuperado

A fração de nitrogênio aparentemente recuperado, avaliado através da porcentagem de nitrogênio dos fertilizantes recuperada pela cultura do milho, é apresentado na figura 17. A porcentagem de nitrogênio recuperada pode ser determinada pela diferença entre o nitrogênio recuperado nas modalidades fertilizadas e na modalidade testemunha.

A eficiência de utilização de nitrogênio pelas plantas normalmente é baixa devido a perdas por lixiviação e em formas gasosas. A imobilização e a retenção de amônio nos minerais de argila podem contribuir para a redução do nitrogênio recuperado.

Nos fertilizantes de liberação gradual pode-se notar que com aumento das doses de nitrogênio, a quantidade de nitrogênio recuperado se reduz, causando uma baixa eficiência de utilização do nitrogênio, sendo que o nitrogênio fica indisponível quando as plantas mais necessitam dele e a sua posterior liberação nem sempre ocorre no momento mais oportuno (SHAVIV, 1993).

O tratamento Org 100 com corretivo orgânico apresentou uma eficiência baixa (34%), que pode ser motivada pela mineralização lenta da matéria orgânica, que não terá disponibilizado o nitrogênio no momento correto.

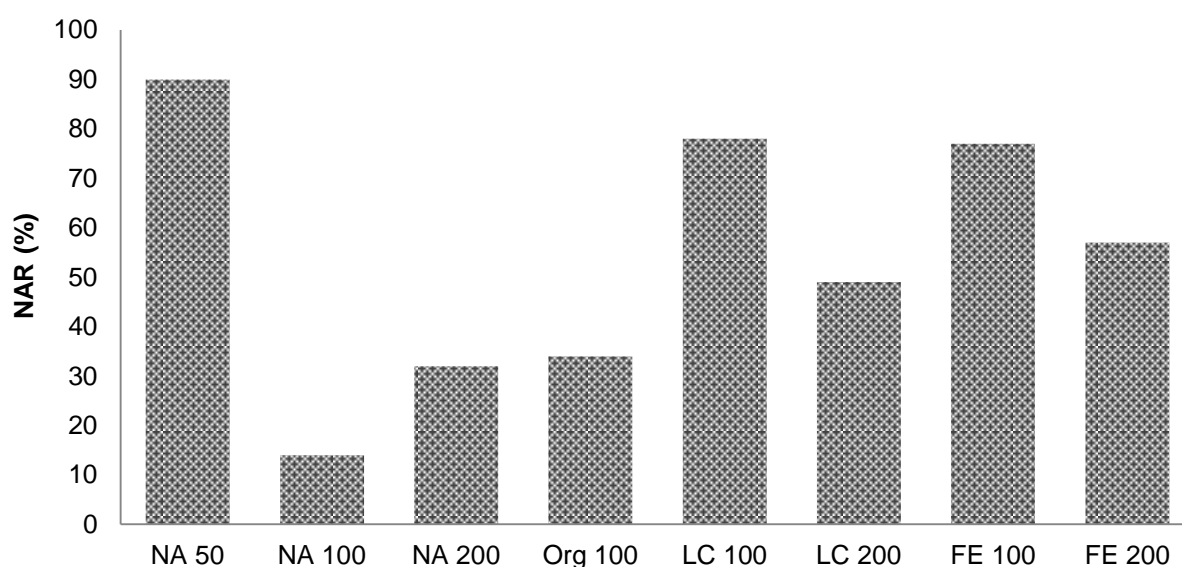


Figura 17 – Teor de nitrogênio aparentemente recuperado (NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>).

Pode-se perceber que a maior eficiência de uso do nitrogênio esteve associada aos tratamentos com menores doses de nitrogênio. Isso é devido a

ausência de mecanismos que imobilizam o nitrogênio no solo, portanto isso permite que a biomassa tire mais partido do nutriente aplicado. Para os fertilizantes de liberação gradual a elevada eficiência de uso do nitrogênio pode ser justificada pelos mecanismos de proteção com que são fabricados. Arrobas *et al.* (2006) avaliaram o efeito de fertilizantes minerais e orgânicos na produção do azevém e concluíram que o processo de liberação lenta do nitrogênio afeta a assimilação deste em culturas anuais de ciclo curto, uma vez que podem ficar privadas de nitrogênio no decorrer das fases importantes do seu desenvolvimento.

A utilização de doses excessivas de nitrogênio é um dos fatores que mais contribui para a baixa eficiência da fertilização nitrogenada. Os decréscimos na porcentagem de nitrogênio recuperado são acentuados quando se excedem a dose técnica ótima (TYLER *et al.*, 1983).

Segundo Grignani (1994) a porcentagem do nitrogênio recuperado dos fertilizantes orgânicos é normalmente baixa em culturas anuais. A razão prende-se com a reduzida fração de nitrogênio do corretivo que se mineraliza durante o ciclo.

Em estudos com elevadas perdas potenciais por lixiviação, um fertilizante estabilizado com inibidor da nitrificação, permitiu aumentar a porcentagem de nitrogênio recuperado (WALTERS e MALZER, 1990).

## 5.4 PROPRIEDADES DO SOLO

### 5.4.1 Nitrogênio facilmente mineralizável

A tabela 7 apresenta os valores do nitrogênio facilmente mineralizável, indicando que a maioria dos tratamentos não apresentam diferenças significativas entre si. O nitrogênio facilmente mineralizável é apresentado segundo três índices,  $\text{NH}_4^+$  extraído com KCl a frio,  $\text{NH}_4^+$  extraído com KCl a quente e a diferença dos dois, que se designa  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável.

O tratamento que apresentou maior valor de nitrogênio hidrolisável foi o FE 100 (31,03 mg kg<sup>-1</sup>), o qual apresentou diferença significativa apenas com o tratamento NA 100, que apresentou o menor valor (22,73 mg kg<sup>-1</sup>).

Tabela 7 – Valores da extração de  $\text{NH}_4^+$  com KCl a quente, para KCl a frio e  $\text{NH}_4^+$  hidrolisável, calculado pela diferença dos anteriores (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200  $\text{kg ha}^{-1}$ ). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Tratamento	Nitrogênio facilmente mineralizável			
	KCl frio	KCl quente	$\text{NH}_4^+$	
	$\text{NH}_4^+$	$\text{NH}_4^+$	hidrolisável	
	$\text{mg kg}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$	$\text{mg kg}^{-1}$	
Test	1,47	26,17	24,70	ab
NA 50	2,50	27,69	25,20	ab
NA 100	2,98	25,71	22,73	b
NA 200	7,76	31,84	24,08	ab
Org 100	4,53	28,27	23,73	ab
LC 100	1,49	32,16	30,67	a
LC 200	5,68	32,03	26,34	ab
FE 100	2,09	33,12	31,03	a
FE 200	9,16	39,65	30,50	ab

Os valores da tabela 7 apresentam correspondência com os valores de amônia no solo antes da aplicação da adubação de cobertura, presentes na figura 10. O tratamento FE 200 se apresentou com maior quantidade de  $\text{NH}_4^+$  no solo PSNT.

#### 5.4.2 pH no solo

O valor de pH no solo foi determinado por dois métodos, designadamente por extração com água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) e cloreto de potássio (KCl). Os valores médios de cada método de pH, são apresentados na tabela 8, de acordo com os respectivos tratamentos.

O valor de pH em água representa a concentração de hidrogênios presentes na solução do solo e designa-se de acidez ativa (WEIL e BRADY, 2017). O valor de pH em água mais elevado encontra-se na modalidade testemunha (Test) com 5,54. Com o aumento da quantidade de fertilizante aplicado houve uma redução no valor de pH. O valor mais baixo se encontra no fertilizante estabilizado (FE 200) com 5,06 o qual indica uma maior absorção de nutrientes catiônicos pelas plantas, nomeadamente o íon  $\text{NH}_4^+$ , com liberação de prótons que reduzem o pH do solo.

Segundo Soveral-Dias *et al.*, (1980) os valores de pH em água classificam o solo de todos os tratamentos como “ácido”, uma vez que os valores estão entre 5 – 5,5.

Tabela 8- Valores de pH na profundidade de 0 a 20 cm, determinados após extração com H<sub>2</sub>O e KCl (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Tratamento	Valores de pH no solo	
	H <sub>2</sub> O	KCl
Test	5,54 a	4,64 bc
NA 50	5,51 ab	4,73 b
NA 100	5,27 bcd	4,70 b
NA 200	5,23 cd	4,66 b
Org 100	5,49 ab	4,96 a
LC 100	5,38 abc	4,63 bc
LC 200	5,30 abcd	4,58 bc
FE 100	5,29 abcd	4,65 b
FE 200	5,06 d	4,49 c

Em relação ao pH em cloreto de potássio, a diferença entre o Org 100 (4,96) e a modalidade FE 200 (4,49) foi de 0,47. Sendo assim o valor mais elevado de pH está na modalidade com matéria orgânica, que pode-se justificar pelo fato da matéria orgânica apresentar efeito de complexação de metais presentes no solo, que pode resultar no aumento do pH (BORTOLINI *et al.*, 2016).

O valor do pH ideal para a cultura do milho é entre 5,5 e 7,5. Caso ocorram valores inferiores pode alterar outras características como a toxidez por alumínio reduzindo o desenvolvimento radicular e a toxidez por manganês reduzindo a disponibilidade de cálcio, potássio, magnésio e molibdênio.

#### 5.4.3 Matéria orgânica

A Figura 18 apresenta o teor de matéria orgânica no solo no final do ciclo do milho. Não houve diferença significativa no teor de matéria orgânica entre os tratamentos fertilizantes em relação a testemunha.

A média do teor de matéria orgânica foi de 22,20 mg kg<sup>-1</sup>. Segundo a classificação do teor de MO dos solos agrícolas de Alves (1989) todos os tratamentos apresentaram um teor médio de matéria orgânica.

O tratamento que mais contribuiu para o aumento do teor da matéria orgânica foi o Org 100 (24,14 mg kg<sup>-1</sup>), que corresponde à aplicação de um corretivo orgânico. Mas esse valor não foi estatisticamente diferente às outras modalidades, uma vez que uma só aplicação não teve um efeito quantitativo significativo. Outra razão é o fato do solo apresentar teor médio de matéria orgânica, pela presença de

outras culturas e fertilização orgânica em anos anteriores, o que reduz a importância da fertilização orgânica.

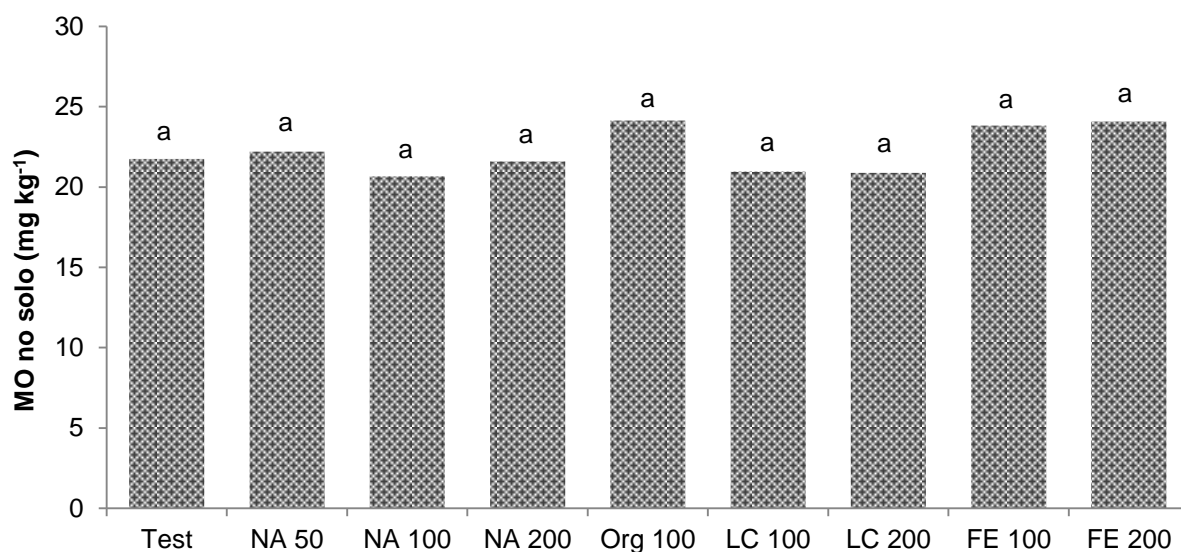


Figura 18 – Teores de matéria orgânica (MO) no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Os tratamentos FE 100 e FE 200 aumentaram o teor de matéria orgânica em relação aos outros tratamentos, principalmente à testemunha. O teor de matéria orgânica é fundamental na hipótese de que a matéria orgânica irá liberar nitrogênio em tempo hábil para uso das plantas, satisfazendo, assim, as necessidades das culturas (AMADO, 1997). Em Portugal é comum utilizar a matéria orgânica como indicador da disponibilidade de nitrogênio no solo.

## 5.5 TEOR DE NUTRIENTES NO SOLO

### 5.5.1 Nitrogênio

A figura 19 apresenta os valores de nitrogênio no solo após o ciclo da cultura do milho. As modalidades LC 100 e LC 200 tiveram os valores mais baixos e com diferença significativa para a modalidade NA 100. Talvez o fato de estes fertilizantes terem mecanismos de encapsulamento com duração de liberação de 9 meses tenham reduzido a sua detecção pelo método analítico.

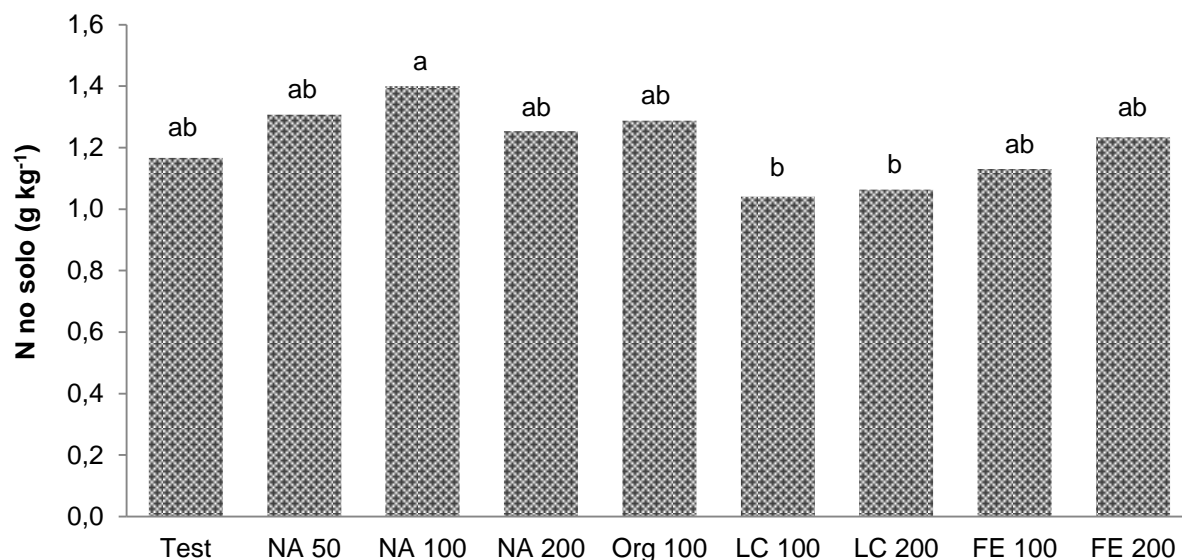


Figura 19 – Teores de nitrogênio no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

As substâncias orgânicas liberam o nitrogênio gradualmente ao longo do ciclo, mesmo que nas primeiras fases o balanço do processo de mineralização/imobilização não seja favorável as plantas. O corretivo orgânico mais tarde libera nitrogênio, mas a disponibilidade do nutriente no solo é tão baixa que o nitrogênio absorvido será assimilado e canalizado para estruturas prioritárias, em desfavor dos órgãos de reserva, não sendo possível detectar diferenças com significado estatístico.

Zhao *et al.*, (2013) descreveram que um fertilizante nitrogenado de liberação controlada promoveu absorção constante durante o ciclo do milho e retardou a senescência das folhas no final do ciclo quando comparado a ureia comum, que promoveu grande absorção de nitrogênio no período vegetativo, isso pode justificar os baixos teores de nitrogênio nos tratamentos LC 100 e LC 200.

Abalos *et al.*, (2014) avaliaram a resposta de inibidores de nitrificação em diversos cultivos, e concluíram que os inibidores em geral promovem aumento em 12,9% na eficiência de uso do nitrogênio. Mas estes efeitos positivos dependem das condições ambientais e de manejo. Para estes autores os melhores resultados para estes inibidores ocorrem em condições de aplicações de altas doses de nitrogênio.

### 5.5.2 Nitrogênio residual

A figura 20 apresenta o teor de nitrogênio residual no solo expresso em nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ). Pode-se notar um crescimento contínuo da quantidade de nitratos com o aumento das doses de nitrogênio nos tratamentos Test, NA 50, NA 100 e NA 200.

O Org 100 apresentou valores elevados, próximos aos de liberação gradual e altas doses de nitrato de amônio, mas em relação aos outros tratamentos com aplicação de  $100 \text{ kg N ha}^{-1}$  se apresentou maior. Isso pode ser justificado pelo fato da decomposição da matéria orgânica que pode ter levado um tempo superior em relação aos outros tratamentos e surgido elevado no solo na parte final do ciclo.

Os altos teores de NA 200 e FE 200 com  $200 \text{ kg N ha}^{-1}$  podem se justificar pelo tempo de liberação dos fertilizantes, onde o resíduo tende a ser maior nos fertilizantes de liberação gradual. O tratamento que apresentou menores quantidades foi o Test (testemunha), o qual não teve aplicação de nitrogênio em nenhum momento, conseqüentemente teve teores de nitrogênio residual mais baixo.

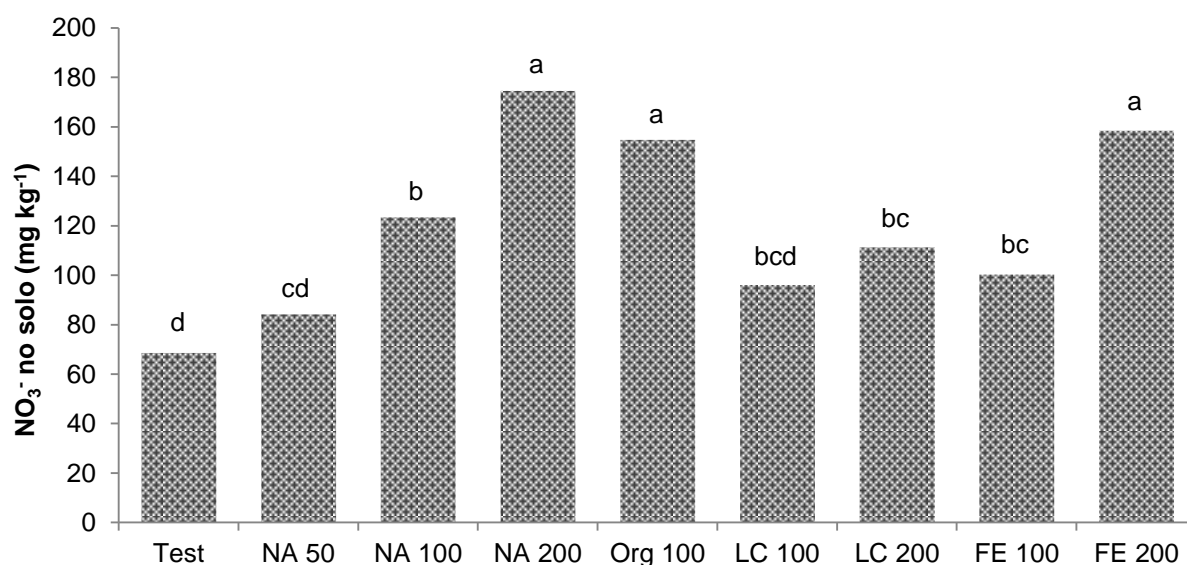


Figura 20 – Teor de nitrogênio residual no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de  $50, 100$  e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

No entanto, deve-se considerar que a quantidade de nitrato disponível no final do ciclo não é apenas determinada pelo balanço entre o nitrogênio aplicado e o absorvido, mas também pelas perdas que ocorrem durante o ciclo. Desta forma, nem sempre um baixo valor de nitrato encontrado após a colheita pode ser

interpretado como evidência para adequado manejo do nitrogênio (SCHRÖDER *et al.*, 2000). Assim como nem sempre um alto teor deste íon no final do ciclo significa que houve excesso de aplicação de nitrogênio, pois pode ter ocorrido a interferência de alguns fatores que alteraram negativamente a demanda e a capacidade de absorção de nitrogênio pela planta como, por exemplo, deficiência hídrica. Este aspeto, contudo, não terá ocorrido neste experimento.

Os teores de nitratos no solo comparando a análise de pré-cobertura (figura 9) e final do ciclo mostram que não houve diferença entre a modalidade Test nas duas datas. Houve um acúmulo de  $\text{NO}_3^-$  no tratamento Org 100, pela disponibilização do nitrogênio total em menor período de tempo e pela matéria orgânica fixar amônia. Para os outros tratamentos o resultado da baixa do teor de nitratos no solo em comparação com as duas datas pode ser justificado pela lixiviação de nitratos, acompanhado de absorção pelas plantas no seu estado inicial.

Para o fertilizante estabilizado com inibidor da nitrificação houve um decréscimo dos teores de nitratos, que comprova sua eficiência, mantendo o nitrogênio na forma amoniacal no solo por maior tempo.

### 5.5.3 Fósforo e potássio

Houve efeito significativo dos tratamentos fertilizantes sobre o teor de fósforo extraível pelo método Egner-Riehm, tal como apresentado na figura 21. De acordo com a classificação proposta por LQARS (2006), os teores de fósforo no solo se apresentaram como muito baixos para os tratamentos LC 100 e LC 200. Para os tratamentos Test, NA 50, NA 100, NA 200 e FE 100 os teores de fósforo foram considerados como baixos. E para os tratamentos Org 100 e FE 200 são considerados com médios.

Os teores de fósforo no solo não apresentaram relação com a concentração de fósforo nas folhas e nas plantas, onde não ocorreram diferenças significativas entre tratamentos. No solo o tratamento que apresentou maior valor foi o Org 100 com  $59 \text{ mg kg}^{-1}$ , onde a composição do corretivo orgânico pode ter influenciado nesse valor, mesmo não se tendo observado maior absorção pela planta.

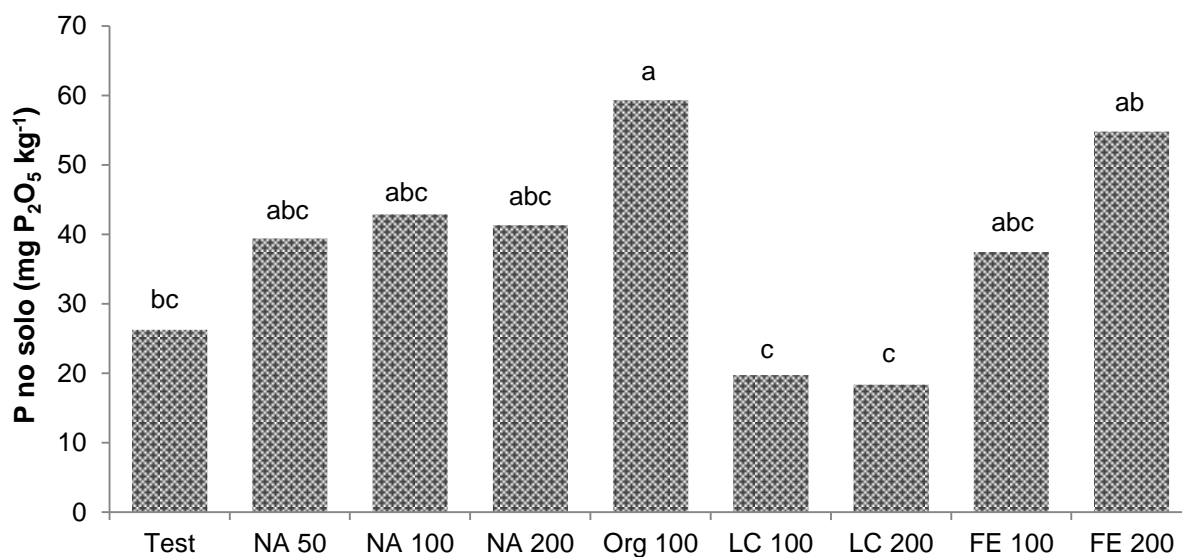


Figura 21 – Teor de fósforo (P) no solo expresso em P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Conforme Weil e Brady (2017), o fósforo por se tratar de elemento de baixa mobilidade no solo, acaba por se concentrar na camada mais superficial, e consequentemente não ficando disponível totalmente para as raízes das plantas.

Considerando a consistência dos resultados do fertilizante estabilizado (FE) e corretivo orgânico (Org 100), estes parecem ser os mais indicados para elevar o teor de fósforo no solo quando necessário.

A figura 22 apresenta os valores de potássio no solo. Houve efeito significativo dos tratamentos fertilizantes sobre o teor potássio extraível pelo método Egner-Riehm. Da mesma forma que ocorreu para o teor de fósforo, o tratamento com o maior teor de potássio foi o Org 100, com 119,33 mg kg<sup>-1</sup>.

De acordo com a classificação do LQARS (2006), o teor de potássio no solo para o tratamento Org 100 foi classificado com alto. Para os demais tratamentos foram classificados como teores médios.

O teor de potássio no solo apresentou relação com a concentração de K nas folhas e na planta inteira no tratamento Org 100. Nas análises foliares a modalidade Test também apresentou valores baixos na concentração de K em relação aos demais tratamentos, fato que pode estar relacionado à alta mobilidade deste nutriente no solo.

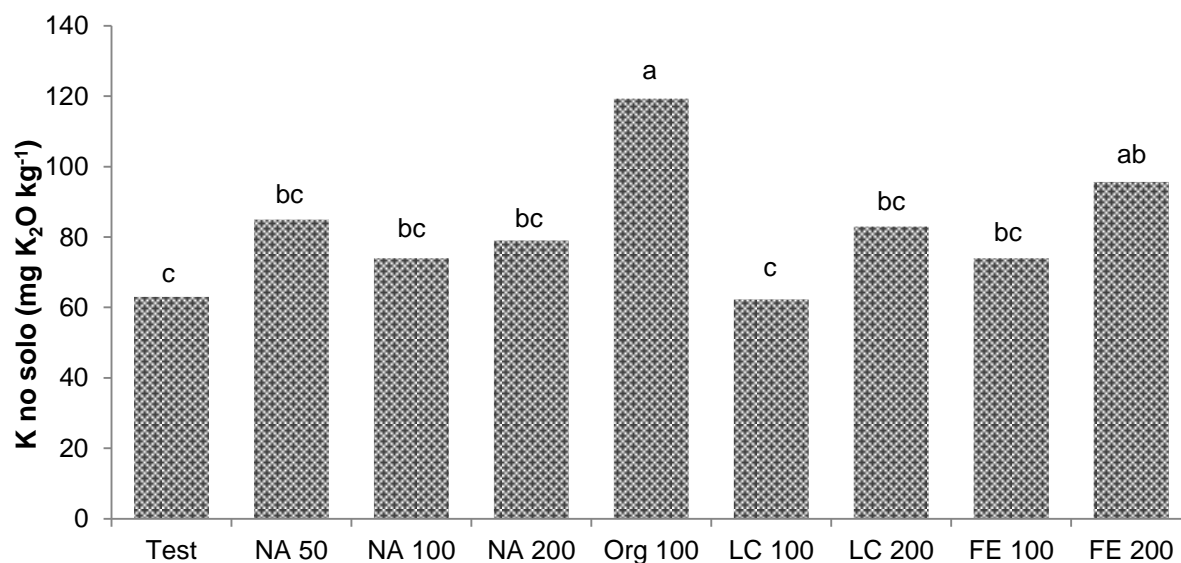


Figura 22 – Teor de potássio (K) no solo expresso em K<sub>2</sub>O (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

De acordo com Ernani *et al.* (2007), o potássio compete com vários cátions pelos sítios de absorção na membrana plasmática, principalmente com NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.

#### 5.5.4 Boro

A figura 23 apresenta a concentração de boro presente no solo. De acordo com LQARS (2006), os valores de classificação do teor de boro no solo são médios para todos os tratamentos, e entre maioria dos tratamentos não se apresentou diferenças significativas.

Como esperado, o tratamento LC 100 e LC 200, com a maior quantidade de boro (1,28% de B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 0,4% de boro elementar) na sua composição, resultou nos maiores teores de boro no solo.

A deficiência de boro, em geral, retarda o crescimento das plantas, afetando primeiro os pontos de crescimento e as folhas novas. As altas concentrações da matéria orgânica e pH adequado do solo contribuíram para teores adequados de boro no solo. Esses resultados encontrados corroboram com outros estudos (ARROBAS *et al.*, 2017; PORTELA *et al.*, 2015; PORTELA *et al.*, 2011), que dão ao micronutriente boro importância no plano anual de fertilização.

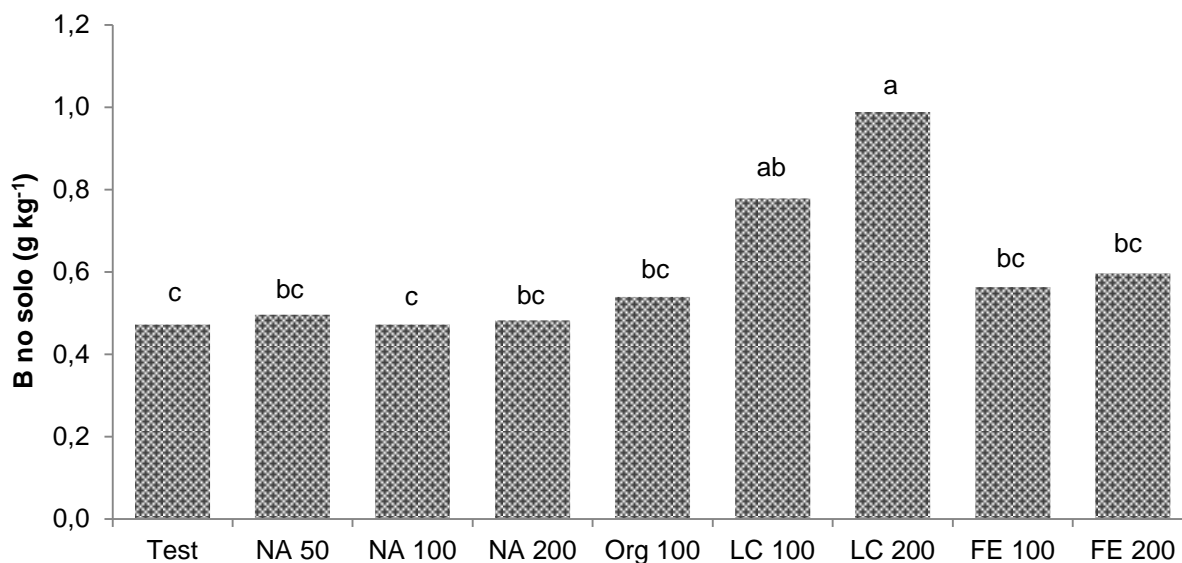


Figura 23 – Teor de boro (B) no solo (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Letras distintas sobre as colunas significa diferença significativa entre os tratamentos pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

### 5.5.5 Capacidade de troca catiônica

A figura 24 apresenta o complexo de troca catiônica presente no solo. Os teores de cálcio não apresentaram diferença significativa e segundo a classificação de Alves (1989) são considerados como valores altos.

Tabela 9 – Capacidade de troca catiônica (Test, testemunha; NA, nitrato de amônio; Org, orgânico; LC, fertilizante de liberação controlada; FE, fertilizante estabilizado; 50, 100 e 200, dose de nitrogênio de 50, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Na coluna, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste Tukey ( $\alpha = 0,05$ ).

Tratamento	Complexo de troca (cmol (+) kg <sup>-1</sup> )											
	Ca <sup>2+</sup>		Mg <sup>2+</sup>		K <sup>+</sup>		Na <sup>+</sup>		AT		CTC	
Test	10,93	a	6,03	ab	0,20	bc	0,21	bc	0,23	a	17,61	a
NA 50	10,24	a	5,43	b	0,26	bc	0,21	bc	0,13	a	16,27	a
NA 100	10,38	a	5,66	ab	0,24	bc	0,23	abc	0,17	a	16,68	a
NA 200	10,47	a	5,89	ab	0,25	bc	0,24	abc	0,17	a	17,02	a
Org 100	10,78	a	6,25	a	0,36	a	0,26	a	0,13	a	17,79	a
LC 100	10,65	a	5,41	b	0,18	c	0,20	c	0,13	a	16,56	a
LC 200	10,12	a	5,46	b	0,25	bc	0,22	abc	0,13	a	16,19	a
FE 100	11,01	a	6,38	a	0,23	bc	0,25	ab	0,10	a	17,97	a
FE 200	10,73	a	6,27	a	0,28	ab	0,22	abc	0,13	a	17,63	a

Para o magnésio são considerados como muito altos. Já o potássio se encontra entre baixo e médio, sendo que o íon  $K^+$  é móvel e pode ser perdido por lixiviação especialmente quando proveniente de fontes solúveis em solos de textura arenosa e com baixa capacidade de troca catiônica (WERLE *et al.*, 2008). O sódio se apresentou com um nível baixo.

A acidez de troca, não teve diferenças significativas entre os tratamentos, apresentando valores médios superiores no tratamento Test com 0,23 e valores mais baixos com a aplicação de nitrogênio. Isso se deve as cargas positivas presentes nos nutrientes dos fertilizantes e corretivos.

Os valores de CTC não diferiram significativamente e segundo a classificação de Alves (1989) são classificados como médios. Com a adição dos fertilizantes de liberação gradual resultou em um aumento da capacidade de troca catiônica, mas o efeito não foi muito expressivo devido às características iniciais do solo, já por si com boa capacidade de troca catiônica.

## 6. CONCLUSÕES

A utilização do teor de  $\text{NO}_3^-$ , em adição ao teor de  $\text{NH}_4^+$  no solo em pré-cobertura, tem potencial para ser utilizado como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo em milho. Este, juntamente com os valores de SPAD, teve uma boa correlação com a produtividade.

Com base na avaliação do estado nutricional das plantas percebe-se que o incremento das doses de nitrogênio aumentou o teor de nutrientes nos tecidos. Os teores de nitrogênio na parte aérea do milho não indicaram haver nenhuma correlação com os teores de nitrogênio no solo e nem sequer com a produtividade.

Os fertilizantes de liberação gradual não apresentaram efeitos significativos em relação ao fertilizante convencional nas variáveis avaliadas, pois proporcionaram resultados semelhantes. Mas os mesmos mostraram diferenças significativas em relação a testemunha e corretivo orgânico e se destacaram por prevenir perdas de nitrogênio para o meio ambiente. O teste de nitrato nos caules apresentou teores de nitratos de médios a altos. O fertilizante de liberação controlada cumpriu seu papel, disponibilizando o nitrogênio em diferentes fases da cultura, que pode ser comprovado pelo teor de nitratos no solo ao final do ciclo ter valores altos. Já o fertilizante estabilizado com inibidor da nitrificação se mostrou eficiente nos primeiros dias mantendo o nitrogênio amoniacal no solo por maior tempo evitando perdas por lixiviação e desnitrificação. Não foi possível notar acréscimos na disponibilidade de nitrogênio na modalidade com corretivo orgânico.

Em relação às características do solo, os efeitos mais relevantes foram observados nos valores de pH, onde houve um decréscimo dos valores com o aumento da aplicação de fertilizantes nitrogenados. A matéria orgânica não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. O nitrogênio total no solo não mostrou correlação com o nitrogênio exportado pela planta, nem com os teores de nitratos na planta e no caule.

O experimento deve ser repetido nos próximos anos para avaliar o efeito em longo prazo dos fertilizantes, avaliando de melhor forma a técnica de liberação dos nutrientes. Os resultados deste primeiro ano terão ficado em parte comprometidos pela elevada disponibilidade de nitrogênio no solo, situação que não deverá repetir-se no próximo ano, uma vez que está instalada uma cultura de inverno para remover o excesso de nitrogênio residual.

## REFERÊNCIAS

- ABALOS, D. SIMON, J. GUARDIAA, G. VALLEJOA, A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. Madrid, 2014.
- AFONSO, S. ARROBAS, M. FERREIRA, I. Q. RODRIGUES, M. A. Leaf nutrient concentration standards for lemon verbena (*Aloysia citrodora Paláu*) obtained from field and pot fertilization experiments. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants 8. Pg.33-40. Portugal, 2018.
- ARATANI, R. G. FERNANDES, F. M. MELLO, L. M. M. de. Adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho irrigado, em sistema plantio direto. Revista Científica Eletrônica de Agronomia, v.5, pg.1-10. Garça, 2006.
- ARNON, D.I. STOUT, P. R. The essentiality of certain elements in minute quantity for plants with special reference to copper. Plant Physiol, pg.371-375. California, 1975.
- ARROBAS, M. MOUTINHO-PEREIRA, J. Fertilização do olival. In: Rodrigues, M. A., Correia, C. M. (Eds.). Manual da safra e contra safra do Olival. pg.21-39. Portugal, 2009.
- ARROBAS, M. RODRIGUES, M. A. TOMÁS, P. Efeito de fertilizantes minerais e orgânicos na produção de azevém (*Lolium multiflorum L.*): Eficiência de utilização de azoto. In: II Congresso Ibérico da Ciência do Solo. Huelva. pg. 166. Portugal, 2006.
- ASSOCIAÇÃO DOS PRODUTORES DE SOJA E MILHO DE MATO GROSSO (Aprosoja-MT). A história do Milho 2016. Disponível em: <<http://www.aprosoja.com.br/soja-e-milho/a-historia-do-milho>> Acesso em: 20 out. 2018.
- ASSOCIATION OF AMERICAN PLANT FOOD CONTROL OFFICIALS (AAPFCO). Official documents 57. West Lafayette: AAPFCO. Canada, 1997.
- BARROS, J. F. C. CALADO J. G. A Cultura do Milho. Escola De Ciências E Tecnologia Departamento De Fitotecnia. Évora, 2014
- BLACKMER, A. M. MALLARINO, A. P. Cornstalk Testing to Evaluate Nitrogen Management. Iowa State Univ. Extension. Available on the Web at: <<http://www.extension.iastate.edu/Publications/PM1584.pdf>>. Iowa, 1996.
- BLAIR, G. Nutrient efficiency what do we really mean? In: RANDALL, P. J.; DELHAITZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Ed.). Genetic aspects of plant mineral nutrition. p. 205-213. Dordrecht: Kluwer Academic, 1993
- BLEY, H. Liberação, nutrição de plantas e lixiviação de potássio de fertilizante revestido. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.

- BORGHI, A. M. CARAMELLI, N. SETTI, A. How abstract is risk for workers? Expertise, context and introspection in abstract concepts. *Reti Saperi Linguaggi Ital. J. Cognit. Sci.* 5. pg.95–118. Roma, 2016.
- BORTOLINI, D. CASSOL, L. C. PIVA, J. T. BOSI, C. ROCHA, K. F. Surface applied lime dynamics and base saturation index in a consolidated no-tillage area. *Comunicata Scientiae* v.7, n4, pg.473-485. Bom Jesus, 2016.
- BREMNER, J. M. Nitrogen-Total. In: Sparks, D. L. (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 3- Chemical Methods*. SSSA. Book series nº 5. Madison, 1996.
- BRYSON, G. M. MILLS, D. N. SASSEVILLE, J. BARKER A. V. *Plant Analysis Handbook III*. Athenas, 2014.
- BURANELLO, R. M. *Sistema privado de financiamento do agronegócio*. Editora Quartier Latin do Brasil, pg. 471. São Paulo, 2009.
- CALOURO, F. *Manual Básico de Práticas Agrícolas: Conservação do solo e da água*. Lisboa, 2000.
- CANTARELLA, H. MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R (Ed.). *Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes: volume 2*, pg. 15-65. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba, 2010.
- CHIEN, S. H. PROCHNOW, L. I. CANTARELLA, H. Recent developments of fertilizer production and use to increase nutrient efficiency and minimize environmental impacts. *Advances in Agronomy*, v. 102, n. 1, pg. 261-316, San Diego, 2009.
- CIVARDI, E. A. SILVEIRA NETO, A. N. RAGAGNIN, V. A. GODOY, E. G. BROD, E. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, n. 1, pg.52-59. Goiânia, 2011.
- CLESCERL, L. GREENBERG, A. E. EATON, A. D. *Standard Methods for Examination of Water e Wastewater (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater)* 20 ed. APHA, AWWA, WEF. 1998.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento) *Levantamentos de safra: 1º levantamento da safra milho: safra 2017/2018*. Brasília, 2018. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 25 jan. 2019.
- COSTA, C. Nitrogen rates and chlorophyll content in maize leaves. *Photosynthetica* 25. Pg.447-450. Iowa, 1991.
- CRUZ, J. C. PEREIRA FILHO, I. A. ALVARENGA, R. CONTIJO NETO, M. M. VIANA, J. H. M. OLIVEIRA, M. D. SANTANA, D. P. *Manejo da cultura do milho em sistema plantio direto. Informe agropecuário*, 27. Belo Horizonte, 2006.
- DAWAR, K. *et al.*, Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. *Biology and Fertility of Soils*, v. 47, n. 2, pg. 139-146, Berlin, 2011.

- DEPARIS, G. A. LANA, M. do C. FRANDOLOSO, J. F. Espaçamento e adubação nitrogenada e potássica em cobertura na cultura do milho. *Acta Scitiarum Agronomy*, v.29, pg.517-525, Cascavel, 2007.
- DIEHL, R. *Agricultura Geral. Técnica Agrária 3, Clássica*. Lisboa, 1989.
- ECKENFELDER, W. *Industrial water pollution control*. 2ª edição, McGraw Hill. Singapura 1989.
- ELEFSINIOTIS, P. WAREHAM, D. G. SMITH, M. O. Use of volatile fatty acids from an acidphase digester for denitrification. *Journal of Biotechnology*, 114. pg. 289–297. New Zeland, 2004.
- FANCELLI, A. L. LIMA, D. *Produção de milho*. Livrocere. Piracicaba, 1982.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). *Crops data*. Disponível em: < <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>> Acesso em: 17 jan. 2019.
- FIRESTONE, M. K. Biological denitrification. In: Stevenson, F. J.(ed.). *Nitrogen in Agricultural Soils*. *Agronomy*, nº 22, pg. 289-318. Madison, 1982.
- FONTOURA, S. M. V. BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the South-Central region of the State of Paraná, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 34. pg.1677-1684. Porto Alegre, 2010.
- FRANÇA, G. E. COELHO, A. M. RESENDE, M. BAHIA FILHO, A. F. C. Parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho irrigado. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. *Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. Relatório técnico anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo: 1992-1993*. pg. 28-29. Sete Lagoas, 1994.
- FRANCIS, D. D. VIGIL, M. F. MOSIER, A. R. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: SCHEPERS, J. S., RAUN, W. R. (Eds.). *Nitrogen in agricultural systems*. WI: ASA, CSSA, SSSA, pg. 255–79. Madison, 2008.
- GOMES, J. M. SILVA, A. D. BARBOSA, J. Os substratos e sua influência na qualidade de mudas. *Nutrição e adubação de plantas cultivadas em substrato*. UFV, pg. 190-225. Viçosa, 2004.
- GONÇALVES JÚNIOR, A. C. NACKE, H. STREY, L. SCHWANTES, D. SELZLEIN, C. Produtividade e componentes de produção do milho adubado com Cu e NPK em um argissolo. *Scientia Agrária*, v.9, pg.35-40. Curitiba, 2008.
- GREGORY, P. J. BISCOE, P. V. Nutrient relations of winter wheat. *J. Agric. Sci* 96. Pg.539-547. Laca, 1981.
- HARGER, N. BRITO, O. R. RALISCH, R. ORTIZ, F. R. WATANAB, T. S. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. *Ciências Agrárias*, v.28, pg.39-44, Semina, 2007.

- HASEGAWA, T. SAWANO, S. GOTO, S. KONGHAKOTE, P. POLTHANEE, A. ISHIGOOKA, Y. KUWAGATA, T. TORITANI, H. FURUYA, J. A model driven by crop water use and nitrogen supply for simulating changes in the regional yield of rain-fed lowland rice in Northeast Thailand. *Paddy and Water Environment* 6, pg. 73-82. Thailand, 2008.
- HAVLIN, J. L. TISDALE, S. L. NELSON W. L. BEATON, J. D. Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management, 8th edition. Pearson, Inc, New Jersey, 2014.
- HAWKESFORD, M. HORST, W. KICHEY, T. LAMBERS, H. SCHJOERRING, J. MOLLER, I. S. WHITE, P. Function of macronutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Elsevier, pg. 135–189. London, 2012.
- HENDRICKSON, L. L. DOUGLASS, E. A. Metabolism of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) in soils. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 25, n. 11, pg. 1613-1618. Oxford, 1993.
- IFA (International Fertilizer Association), IFADATA. France: International Fertilizer Association, 2016. Disponível em: <<http://ifadata.fertilizer.org/ucResult.aspx?temp=201602180235659>>. Acesso em: 17 out. 2018.
- IFA (International Fertilizer Association). IFADATA: International Fertilizer Association, 2017. Disponível em: <<http://ifadata.fertilizer.org/ucResult.aspx?temp=20170218023916>>. Acesso em: 17 out. 2018.
- JONES Jr., J. B. *Laboratory Guide for Conducting Soil Tests and Plant Analysis*. CRC Press, Boca Raton, Washington, 2001.
- KIEHL, E. J. *Novo fertilizantes orgânicos*. pg. 248. Piracicaba, 2010.
- KRAJEWSKA, B. UREASES I. Functional, catalytic and kinetic properties: a review. *Journal of Molecular Catalysis*, v. 59, pg. 9-21. Amsterdam, 2009.
- LOPES, A. S. E GUILHERME, L. R. G. *Fertilidade do solo*. Departamento de Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras – UFLA. Lavras, 2014
- LQARS (Laboratório Químico Agrícola Rebelo da Silva). *Manual de fertilização das culturas*. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e Pesca. Instituto Nacional de Investigação Agrária e das Pesca. Lisboa, 2006.
- MACHADO, E. C. PEREIRA, A. R. FAHL, J. I. ARRUDA, H. V. SILVA, W. J. TEIXEIRA, J. P. F. Análise quantitativa de crescimento de quatro variedades de milho em três densidades. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 17, n. 6, pg. 825-833. Brasília, 1982.
- MAGALHÃES, A. C. N. Análise quantitativa do crescimento. In: FERRI, M. G. (Ed.). *Fisiologia vegetal*. EDUSP. v. 1, pg. 331-349. São Paulo, 1979.
- MALAVOLTA, E. GOMES, F. P. ALCARDE, J. C. *Adubos e Adubações*. Nobel. pg. 29-110. São Paulo, 2002.

- MAP (Ministério de Agricultura e Pescas). Laboratório de Química Agrícola "Rebelo da Silva" Sector de Fertilidade de solo: Documentação 2. Série Divulgação. Lisboa, 1977.
- MARSCHNER, P. Mineral Nutrition of Higher Plants, Third Edition. Academic Press, África, 2011.
- MARTIN, T. N. CUNHA, V. S. BULCÃO, F. P. Manejo da adubação nitrogenada no milho. Grandes culturas – Cultivar, 173. pg.36-38. Sete Lagoas, 2014.
- MEHOUACHU, T. LEMEUR, R. Effect of nutritional stress on photosynthesis rate of potato (*Solanum tuberosum* L) pg. 541 – 546. In: RODRIGUES, M. A. (2000). Gestão do azoto na cultura da batata (Tese de Doutoramento). Universidade de Trás-os-Montes, Alto Douro, 1993.
- MOTA, E. P. Fertilizantes nitrogenados de liberação gradual: longevidade e volatilização em ambiente controlado. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2013.
- MULLA, D. J. STROCK, J. S. Nitrogen transformation process in soils. In: SCHEPERS, J. S., RAUN, W. R. (Eds.), Nitrogen in Agricultural Systems. Agronomy Monograph n.º 49. ASA, CSSA, SSSA. pg. 361–400. Madison, 2008.
- NIELSEN, B. CAMBERATO, J. Corn Stalk Nitrate Tests – Research and Recommendation Update. West Lafayette, 2011.
- NUNES, J.L.S. Soja: Histórico. Disponível em: <<https://www.agrolink.com.br/culturas/soja/historico.aspx>> Acesso em 01 set. 2018.
- OERTLI, J.J. Controlled release fertilizers. Fert. Res., 1: 103-123. Zurich, 1980.
- ONASANYA, R. O. AIYELARI, O. P. A. ONASANYA, S. Growth and Yield Response of Maize (*Zea mays* L.) to Different Rates of Nitrogen and Phosphorus Fertilizers in Southern Nigeria. World Journal of Agricultural Sciences. pg.400-407. Nigeria, 2009.
- PEREIRA FILHO, I. A. Cultivo do milho. J. C. C. Cruz (Ed.). Embrapa Milho e Sorgo. Porto Alegre, 2010.
- RAMBO, L. M. XIONG, Y. REGIS FERREIRA DA SILVIA, P. Leaf and canopy optical characteristics as crop N status indicators for field nitrogen management in corn. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 173, pg.434-443. Paris, 2010.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F. da; BAYER, C.; ARGENTA, G.; STRIEDER, M.L.; SILVA, A.A. da. Teor de nitrato como indicador complementar da disponibilidade de nitrogênio no solo para o milho. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, pg.731-738. Uberlândia, 2007.
- REETZ, H.F. Fertilizantes e o seu uso eficiente. International Fertilizer Industry Association, Paris, 2017.

- SANTOS, J. Q. Fertilização - Fundamentos da Utilização dos Adubos e Corretivos. Publicações Europa-América, Mem Martins pg.442. Lisboa, 1991.
- SANTOS, M. C. R. PACHECO, D. M. SANTANA, F. J. P. RODRIGUES, A. M. F. A eutrofização das lagoas das Sete Cidades e Furnas (S. Miguel – Açores). Análise evolutiva entre 1988 e 2002. Associação portuguesa dos recursos hídricos. Açores, 2005.
- SANZ-COBENA, A. *et al.*, An inhibitor of urease activity effectively reduces ammonia emissions from soil treated with urea under Mediterranean conditions. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, v. 126, n. 3/4, pg. 243-249. Amsterdam, 2008.
- SHAVIV, A. Controlled release fertilizers. In: IFA INTERNATIONAL WORKSHOP ON ENHANCED-EFFICIENCY FERTILIZERS, 2005, Frankfurt. Proceedings... Frankfurt: IFA, 2005. Disponível em: <<http://www.fertilizer.org/ItemDetail?iProductCode=7968Pdf&Category=AGRI&WebsiteKey=411e9724-4bda-422f-abfc-8152ed74f306>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- SILVA, F. LIBARDI, P. MARTINS, M. Efeito da adubação nitrogenada nas propriedades químicas de um Latossolo, cultivado com milho em sucessão à aveia-preta, na implantação do sistema plantio direto. *Acta Scientiarum. Agronomy*. 29. pg. 639-647. Maringá, 2007.
- SILVA, M. V. Adubos e Adubações. Livraria Clássica Editora, Lisboa, 1982.
- SILVA, W. J. SANS, L. M. A. MAGALHÃES, P. C. DURÃES, F. Exigências climáticas do milho em sistema plantio direto. *Informe agropecuário*, 27. pg.14-25. Belo Horizonte, 2005.
- SIMS, J. T. Lime requirement. In: *Methods of Soil Analysis. Part 3 – Chemical Methods*. SSSA Book Series. pg.491-515. Madson, 1996.
- TIMILSENA, Y. P. *et al.*, Enhanced efficiency fertilizers: a review of formulation and nutrient release patterns. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, v. 95, n. 6, pg.1131-1142, Londres, 2014.
- TRENKEL, M. E. Improving fertilizer use efficiency. Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association. Paris, 1997.
- TRENKEL, M. E. Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient efficiency in agriculture. 2nd ed. International Fertilizer Industry Association, pg. 163. Paris, 2010.
- TRENKEL, M. E. Ullmann's Agrochemicals. Fertilizers, 3 (Chap. 4.4 and 4.5). Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. Weinheim, 2007.
- TYLER, K. B. BISHOP J. C. Efficiency of nitrogen uptake by potatoes. Pg.261-269. Portugal, 1983

- ULLMANN'S AGROCHEMICALS Vol. 1. Wiley – VCH Verlag GmbH & Co.. ISBN 978-3-527-31604-5. Weinheim, 2007.
- USDA (United States Department Of Agriculture). Grain: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service/USDA - Office of Global Analysis. pg.1-56. Burma, 2016.
- VALDERRAMA, M. et al. Fontes e doses de nitrogênio e fósforo em feijoeiro no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 39, n. 3, pg. 191-196. Goiânia, 2009.
- VAN REEUWIJK, L. P. Procedures for soil analysis. Sixth edition. ISRIC. Wageningen, 2002.
- VARENNE, A. Produtividade dos Solos e Ambiente. Escolar Editora, Lisboa, 2003.
- VASCONCELLOS, C. A.; VIANA, M. C. M.; FERREIRA, J. J. Acúmulo de matéria seca e de nutrientes em milho cultivado no período inverno-primavera. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, n. 11, pg. 1835-1945. Brasília, 1998.
- WALTERS, D. T. MALZER, G. L. Management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: I. Yield and fertilizer use efficiency. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54. pg.115 - 122. Lincoln, 1990.
- WEF, ASCE, EWRI. Biological nutrient removal (BNR) operation in wastewater treatment plants. Manual of Practice nº 29 of WEF and Manuals and Reports on Engineering Practice nº 109 of WEF, ASCE, EWRI, WEF Press, McGraw-Hill. New York, 2005.
- WEIL, R. R.; BRADY, N.C. The nature and properties of soils. 15th Edição. Pearson Education Limited. England, 2017.
- WERLE, R. GARCIA, R. A. ROSOLEM, C.A. Lixiviação de potássio em função da textura e da disponibilidade do nutriente no solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 32. Londres, 2008.
- WERNER, R.S. Soil properties and plant biomass production in natural rangeland management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.40. Vilçosa, 2007.
- WESTERMAN, R. L. Soil Testing And Plant Analysis. Third Edition. Madson, 1990.
- YAMADA, T.D. ABDALLA, S.R.S. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? *Infomações Agrônômicas*, 91. P. 5. Potafos. Piracicaba. 2000.
- ZHAO, S. JOHNSTON, A. M. Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China. *Field Crops Research* 169. Pg.116–122. China, 2014.