

Efeito do uso de biochar e zeólitos na dinâmica do fósforo no solo e na produtividade do milho

Bruna Larissa Feix

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para
obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia.*

Orientado por

Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues

Manuel Ângelo Rosa Rodrigues

Carlos Alberto Casali

Bragança

2020

BRUNA LARISSA FEIX

Efeito do uso de biochar e zeólitos na dinâmica do fósforo no solo e na produtividade do milho

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. Dr. Margaria Maria P. Arrobas

Prof. Dr. Manuel Ângelo Rosa Rodrigues

Prof. Dr Carlos Alberto Casali

BRAGANÇA

2020

Agradecimentos

Primeiramente e acima de tudo quero agradecer a Deus por ter me dado discernimento durante esse ciclo que vivenciei, por ter me dado forças nos momentos mais difíceis o que me fez com que não desistisse, por nunca me abandonado. Agradeço também a Nossa Senhora Aparecida por sempre estar intercedendo por mim e pela minha família.

Agradeço imensamente aos meus pais Neusa C. Feix e Eloi J. Feix por nunca desistirem de mim, por terem acreditado nesse sonho, por terem investido nisso tudo e deixo claro que sei que não foi fácil mais que no fim sempre vem a recompensa. Obrigado por serem vocês o meu pilar, obrigado por ficarem horas comigo na ligação pra matar as saudades e pelas palavras de apoio as quais me reergueram sempre. Amo vocês imensamente.

Agradeço ao meu irmão Eduardo H. Feix por ter me dado forças e incentivo sempre, te amo. A minha família num todo, tios (as), meus avós e primos, a vocês todos minha eterna gratidão, amo vocês.

Também meu muito obrigado aos meus amigos, que sempre me colocaram pra cima e me apoiaram me fazendo acreditar e me aturando nos momentos mais cansativos dessa jornada em especial a Surian F. Almeida, Ketrin L. Kubiak, Laís da Silva, Thainara W. Iesbik, Jessica S. Guardezi, Gabriel P. Amboni e Igor P. Hendges, amo vocês.

Minha eterna gratidão aos meus excelentíssimos orientadores, Margarida M. Pereira Arrobas, e professor Manuel A. R. Rodrigues por me acolherem tão bem em Portugal, pelos enormes ensinamentos passados, pelo tempo dedicado, por terem sido para mim como mais que verdadeiros mestre e sim pais.

Ao Professor Dr. Carlos A. Casali meu co-orientador na dissertação e meu orientador durante toda a minha graduação no Brasil pelos inúmeros ensinamentos repassados durante todo esse período, e por toda a dedicação de um verdadeiro pai de graduação para com a minha pessoa. E a todo os envolvidos nesse estudo, ao grupo e amigos de ambos os laboratórios. Gratidão a vocês. E por fim mais não menos importante a duas instituições de ensino que estão inteiramente ligadas a este feito, Universidade Tecnológica

Federal do Paraná – Campus Dois Vizinhos e ao Instituto Politécnico de Bragança, pela grande oportunidade e experiência proporcionada.

Resumo

O fósforo (P) é um dos nutrientes de maior importância na fertilização das culturas. No solo pode ser encontrado em diferentes frações orgânicas e inorgânicas de distinta biodisponibilidade para as plantas. Alguns condicionadores de solo como biochar e zeólitos, podem ajudar a regular a sua biodisponibilidade no solo. Desta forma, objetivou-se avaliar o efeito destes condicionadores e sua interação com a fertilização fosfatada em parâmetros fisiológicos da cultura do milho, em experimentos instalados a campo e em vasos. Em campo, com delineamento fatorial com três níveis de condicionadores (biochar, zeólitos e mineral) e quatro doses de P (0, 50, 100 e 200 kg P₂O₅ ha⁻¹) e três repetições. Em vasos, em delineamento completamente casualizado, com os tratamentos Controle, Biochar, Biochar + P mineral, Zeólitos, Zeólitos + P mineral e P mineral. Realizaram-se determinações da intensidade da cor verde e da fluorescência das clorofilas e avaliou-se a produtividade de matéria seca. Análises químicas do solo foram determinadas no experimento em vasos e análises químicas dos tecidos vegetais foram realizadas nas plantas de ambos os experimentos. Realizou-se também o fracionamento de fósforo Hedley e a atividade da enzima fosfatase ácida. As determinações fisiológicas se demonstraram pouco sensíveis aos tratamentos quer nos vasos quer no campo. Quanto a produção de matéria seca nos vasos e no campo, ficou clara a resposta da cultura à adubação fosfatada. Os condicionadores Biochar e Zeólitos originaram aumentos no teor de P nas plantas de milho tanto no experimento em vasos como também a campo em comparação com o tratamento mineral. A aplicação de P aumentou os valores de P extraível, P lábil, P exportado e atividade da fosfatase ácida, independentemente da associação ou não com os condicionadores do solo.

Palavras-chaves: *Zea mays*, estado nutricional, produção de matéria seca, fracionamento do fósforo, condicionadores de solo.

Abstract

Phosphorus (P) is one of the most important nutrients in crop fertilization. In the soil it can be found in different organic and inorganic fractions of different bioavailability for plants. Some soil conditioners, such as biochar and zeolites, can help regulate their bioavailability in the soil. Thus, the objective of this work was to evaluate the effect of these soil conditioners and their interaction with phosphate fertilization in physiological parameters of maize crop, in experiments carried out in the field and in pots. In the field, the experiment was arranged as a factorial design with three levels of the factor soil conditioning (biochar, zeolites and mineral) and four rates of P (0, 50, 100 and 200 kg P₂O₅ ha⁻¹) and three replicates. In pots, the experiment was arranged as a completely randomized design, with the treatments Control, Biochar, Biochar + P mineral, Zeolites, Zeolites + P mineral and P mineral. The greenness of the leaves and the chlorophyll fluorescence were performed and the total dry matter yield determined. Several soil properties were also determined in the pot experiment as well as the elemental composition of plant tissue (leaves and aboveground biomass). Hedley phosphorus fractionation and acid phosphatase enzyme activity were also carried out. Physiological determinations were shown to be little sensitive to fertilizer treatments both in the pot and field experiments. As for the production of dry matter in pots and in the field, the response of the crop to phosphate fertilization was clear. The conditioners Biochar and Zeólites increased the P concentration in the maize plants both in the pot and also in the field experiment in comparison to the mineral treatment. The application of P increased the values of extractable P, labile P, P recovered in plant tissues and acid phosphatase activity, regardless of the association or not with soil conditioners.

Keywords: Zea mays, nutritional status, dry matter production, phosphorus fractionation, soil conditioners.

Sumário

1. Introdução	12
2. Objetivos	14
2.1 Geral.....	14
2.2 Específicos.....	14
3. Referencial Teórico	15
3.1 A cultura do milho.....	15
3.1.1 Origem e evolução.....	15
3.1.2 Características morfológicas.....	15
3.1.3 Importância econômica.....	17
3.1.4 O milho como planta forrageira.....	18
3.2 Gestão do fósforo nos solos agrícolas.....	19
3.2.1 Fósforo nas plantas.....	19
3.2.2 Fósforo no solo e biodisponibilidade para as plantas.....	20
3.2.3 Adubação fosfatada e meio ambiente.....	21
3.3 Condicionadores do solo e biodisponibilidade de fósforo.....	22
3.3.1 Biochar.....	22
3.3.2 Zeólitos.....	23
3.4 Fertilização fosfatada no milho.....	24
3.5 Uso de condicionadores na cultura do milho.....	25
4. Materiais e métodos	27
4.1 Caracterização dos locais.....	27
4.1.1 Clima.....	27
4.1.2 Solo e condicionadores.....	28
4.2 Delineamentos experimentais.....	29
4.2.1 Experimento a campo.....	29

4.2.2 Experimento em vasos.....	29
4.3 Instalação e manutenção dos ensaios	30
4.3.1 Experimento a campo.....	30
4.3.2 Experimento em vasos	31
4.4 Colheita de amostras e análises laboratoriais	32
4.4.1 Experimento a campo.....	32
4.4.2 Experimento em vasos	32
4.4.3 Análises de tecidos vegetais	33
4.4.4 Análises de solos	34
4.4.5 Determinação da intensidade da cor verde e da fluorescência das clorofilas	36
4.5 Tratamento de dados	37
5. Resultados	38
5.1 Experimento em vasos.....	37
5.1.1 Avaliações fisiológicas.....	38
5.1.2 Avaliações nas plantas.....	39
5.1.3 Avaliações do solo	42
5.2 Experimento a campo	45
5.2.1 Avaliações fisiológicas e biomassa	45
5.2.2 Avaliações nas folhas.....	48
5.2.3 Avaliações nas plantas inteiras	51
6. Discussão	54
7. Conclusão	58
8. Referencias	59

Lista de Tabelas

Tabela 1. Propriedades do solo antes da instalação dos ensaios nos vasos e na Quinta St ^a Apolônia.....	28
Tabela 2. Principais características dos condicionadores de solo utilizados neste estudo	29
Tabela 3. Fluorescência das clorofilas em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.....	38
Tabela 4. Leituras de NDVI e SPAD em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.....	39
Tabela 5. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg na matéria seca das plantas de milho em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.	40
Tabela 6. Resultado da concentração de micronutrientes B, Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca das plantas de milho cultivadas nos vasos em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada	41
Tabela 7. Resultados da matéria orgânica, pH e P e K extraíveis no solo em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.	42
Tabela 8. Resultados do complexo de troca no solo em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada	43
Tabela 9. Concentração de B, Cu, Zn, Fe e Mn em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.	44
Tabela 10. Fluorescência das clorofilas em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹)	46
Tabela 11. Leituras de NDVI e SPAD realizadas nas plantas através dos indicadores da intensidade de cor verde, em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).....	47
Tabela 12. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg das folhas de milho colhidas a meio da estação de crescimento em função do	

condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).....	49
Tabela 13. Resultados da concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu das folhas de milho colhidas a meio da estação de crescimento em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).....	51
Tabela 14. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg nas plantas inteiras de milho em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).....	52
Tabela 15. Resultados da concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu nas plantas inteiras de milho em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).....	53

Lista de Figuras

Figura 1. Imagens dos ensaios, Quinta do Poulão (A) e estufas (B).....	27
Figura 2. Precipitação e temperatura média mensais registadas na estação meteorológica da Quinta de Santa Apolónia durante o período experimental, 2019.	28
Figura 3. Produção de matéria seca em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.....	39
Figura 4. P recuperado em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.	41
Figura 5. Fósforo disponível em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.....	44
Figura 6. Análise da fosfatase ácida em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada.	45
Figura 7. Produção de matéria seca em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).	48
Figura 8. P recuperado (mg ha ⁻¹) em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P ₂ O ₅ ha ⁻¹).	50

1. Introdução

Para se obter uma produção de qualidade e de forma eficiente é habitual a aplicação ao solo de fertilizantes de síntese industrial, embora no solo estejam presentes os nutrientes necessários às plantas, quer micro quer macronutrientes. Contudo, nem todos estão disponíveis para a planta na quantidade necessária para suprir o que a cultura necessita do início até ao fim de seu desenvolvimento (SERRANO, 2014).

O fósforo (P) juntamente com o nitrogênio (N) e o potássio (K) são os nutrientes de maior importância para o desenvolvimento da planta. O P tem como algumas funções atuar na fotossíntese, no armazenamento e na transferência de energia e na composição do ácido desoxirribonucléico (DNA) e ácido ribonucléico (RNA), que são essenciais no desenvolvimento de frutos e sementes (HAVLIN et al., 2013). No ano de 2016 o uso agrícola de P (expresso em P_2O_5) em Portugal foi de 49587 toneladas (FAOSTAT, 2017).

No solo, o P pode ser encontrado em diferentes frações orgânicas e inorgânicas (CASALI, 2012), as quais estão diretamente ligadas a parâmetros biológicos e bioquímicos do solo, afetando a sua dinâmica. Os estudos sobre as formas de P no solo podem auxiliar na compreensão das interações existentes entre as fontes e drenos desse nutriente no solo, os quais dependem de vários fatores, tais como as condições edafoclimáticas, manejo e o sistema de cultivo, fertilizantes aplicados, matéria orgânica e a microbiologia atuante no solo (TIECHER, 2011).

De uma maneira geral, o P disponível no solo não é suficiente para o crescimento plantas, pelo que é normalmente necessária uma suplementação com fertilizantes, tendo em vista uma boa produção. O conhecimento pelos produtores da importância do P para as plantas pode levar a que se apliquem doses excessivas, o que se apresenta como um dos principais pontos de discussão na agricultura atual, principalmente a de fertilizantes fosfatados cujas reservas minerais se estão a esgotar e podem causar problemas ambientais (TIECHER, 2011). Os dados da FAO (FAOSTAT, 2017) mostram esse efeito, quando em 2012 o uso era de 17,87 kg/ha e em 2016 foi de 28,53 kg/ha.

O P aplicado em excesso no solo pode gerar problemas ambientais, especialmente quando se trata da qualidade da água superficial. A elevação no teor de P das águas causa eutrofização, que origina o crescimento de algas seguido por períodos da sua decomposição, o que origina consumo de oxigénio que pode colocar em risco a vida aquática incluindo os peixes (KLEIN e AGNE, 2013).

Uma maneira de tentar solucionar esses problemas e ter-se maior sustentabilidade, uma prioridade atual na atividade humana, é recorrendo ao uso de condicionadores do solo, que buscam regularizar a biodisponibilidade do P bem como de outros nutrientes para as plantas, a capacidade de troca de cátions (CTC) no solo, a biologia do solo, o pH, e a retenção de água.

Dentre os inúmeros condicionadores que podem ser usados, destacam-se os biocarvões (biochar) que são compostos produzidos a partir da pirólise de biomassa de restos de culturas e de madeira, dentre tantos outros resíduos oriundos da agropecuária (NÓBREGA, 2011). Os zeólitos são também condicionadores importantes. Os zeólitos são minerais aluminossilicatos cristalinos hidratados de metais alcalinos ou alcalino-terrosos, os quais estão estruturados em redes cristalinas tridimensionais rígidas (BERNARDI et al., 2012).

Tais condicionadores apresentam características físicas e químicas as quais tem grande capacidade de apresentarem resultados na mudança estrutural dos solos, na capacidade de retenção de água e no aumento da biodisponibilidade de nutrientes.

O milho (*Zea mays* L.) pertencente à ordem Poales e à família das Poaceae, uma cultura de grande importância econômica em todo o mundo, que é utilizada na alimentação humana e animal sendo associada tanto a produção de grão como de silagem. Apresenta características nutricionais de grande potencial, tanto para humanos como animais, tendo grande contribuição para a vitalidade das economias regionais e nacionais de diversos países, incluindo Portugal (BARROS e CALADO, 2014).

2. Objetivos

2.1. Geral

Avaliar o efeito de condicionadores de solo, como biochar e zeólitos e a sua interação com a fertilização fosfatada, nas propriedades do solo, em particular nas frações do fósforo com significado biológico e no crescimento e produtividade da cultura do milho

2.2. Específicos

- Avaliar o efeito dos condicionadores de solo biochar e zeólitos, nas frações do fósforo com significado biológico no solo.
- Avaliar o efeito das distintas doses de adubação fosfatada nas frações do fósforo no solo e no crescimento e produtividade da cultura do milho.
- Avaliar o efeito dos condicionadores de solo e da adubação fosfatada no estado nutricional da planta de milho.
- Avaliar a performance das plantas através da determinação da fluorescência das clorofilas e intensidade da cor verde.

3. Referencial Teórico

3.1 A cultura do milho

3.1.1 Origem e evolução

De acordo com Barros e Calado (2014) o milho é classificado botanicamente como pertencendo à ordem Poales, à família Poaceae, à tribo Maydeae, ao género *Zea* e à espécie *Zea mays* L. Sua origem vem sendo discutida há anos, porém a teoria mais aceita é de que ele tenha se originado de uma planta parental conhecida como Teosinto, uma vez que ambos apresentam 20 cromossomos, sendo estes homólogos (NETO et al., 2008).

A diferença entre ambos se encontra justamente a partir da domesticação do milho que se iniciou no México em torno de 9000 anos atrás. As espécies não cultivadas de teosinto distribuem-se pelas espécies *Z. diploperennis*, *Z. luxurians*, *Z. nicaraguensis* e *Z. perennis*. A semente do teosinto é protegida por uma casca muito dura tornando-a imprópria para consumo. Através de vários cruzamentos e seleções realizadas pelos povos mexicanos surgiu o que hoje se conhece como sendo o milho (*Zea mays* subsp. *mays*) o qual apresenta uma espiga rígida, o que dificulta a perda de grãos, pois o teosinto mesmo que apresentando grãos duros os mesmos se dispersavam com muita facilidade (WANG et al., 2015).

A espécie possui uma vasta gama de variedades cultivadas (sobretudo híbridos) com potencial de adaptabilidade a várias regiões do globo, desde o Equador até às regiões temperadas, e desde o nível do mar até altitudes acima de 3600 metros. Assim, pode-se encontrar o cultivo do milho em diferentes climas, desde tropicais, subtropicais e temperados (BARROS e CALADO, 2014).

3.1.2 Características morfológicas

O desenvolvimento do milho como o de qualquer outra espécie, pode dividir-se em diferentes estádios fenológicos, sendo que seus aspetos

morfológicos transparecem as condições em que a planta se encontra em dado momento.

Sua semente é classificada como uma cariopse. O seu sistema radicular é classificado como sendo fasciculado, possuindo raízes primárias, que são aquelas originárias da radícula (em rigor nesta fase o sistema radicular é aprumado), raízes secundárias, que surgem no nó de afilamento e têm grande capacidade de ramificações, e por fim surgem as raízes adventícias nos nós acima do nível do solo, que são responsáveis pela sustentação física da planta, por vezes também chamadas raízes estabilizadoras. O caule pode atingir vários metros de altura, embora nas variedades comerciais raramente ultrapasse dois metros (BARROS e CALADO, 2014).

As folhas são estreitas, paralelinérveas, e possuem uma bainha com nervura central bastante vigorosa. O milho é uma planta monóica que possui os órgãos masculinos e femininos numa mesma planta, mas em inflorescências separadas. A inflorescência masculina é uma panícula (pendão), situada no topo do colmo, já a feminina é uma espiga, onde a partir do ovário se desenvolvem os estilo-estigma. A floração normalmente se dá entre os 50 – 100 dias após a semeadura do milho (BARROS e CALADO, 2014).

Para se obter uma boa produtividade, o milho necessita de condições climáticas adequadas, como temperatura, luminosidade, umidade atmosférica e condições hídricas no solo. Segundo Cruz et al. (2010) as temperaturas mais favoráveis variam de acordo com o estágio em que a planta se encontra. Em geral, as temperaturas ideais da emergência até a floração variam entre 24 e 30 °C, sendo que abaixo de 10 °C o crescimento da planta se torna quase que nulo e acima de 30 °C o rendimento de grãos é reduzido.

A cultura apresenta uma elevada necessidade em água. Porém, pode ser cultivada em locais que apresentam precipitação entre 250 até 5000 mm anuais. Estima-se que durante o ciclo de desenvolvimento da planta a mesma consuma em média de 600 mm. Uma planta de milho consome em torno de 2,5 mm/dia, porém destaca-se que isso varia conforme o estágio em que se encontra, uma vez que quando se encontra entre o espigamento e a maturação consome em torno de 5 – 7,5 mm/dia. O déficit hídrico no milho pode ocasionar danos desde a germinação até o fim do ciclo (CRUZ et al., 2010).

Contudo, para se obter uma boa produção, as fases mais críticas são do pendoamento ao início do enchimento de grãos, sendo os componentes de rendimento mais afetados o número de grãos por espiga e de espigas por planta (BERGAMASCHI, 2004). De acordo com um estudo realizado por Almeida (2016), quando há déficit hídrico nas fases de florescimento e pendoamento os danos chegam aos 20,5 e 29,3%, respectivamente, embora Bergamaschi (2004) refira que as perdas podem chegar até a 50%.

3.1.3 Importância econômica

De acordo com Contini et al. (2019), a produção mundial de milho registou um aumento de 82% das safras de 2000/01 a 2017/18, passando de 591 milhões de toneladas para 1076 milhões de toneladas. Destacam-se os Estados Unidos e a China com 34,5% e 24,5% da produção mundial, respectivamente. Tratando-se do comércio internacional, o milho é uma 'commodity' agrícola importante, em que existem quatro grandes exportadores, Estados Unidos, Brasil, Argentina e Ucrânia. Segundo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) a na safra 2018/19 a exportação mundial foi de 176,216 milhões de toneladas, e o total de importação nesta mesma safra foi de 163,233 milhões de toneladas.

No Brasil o milho é cultivado em todas as regiões. A produção brasileira de milho nos últimos 40 anos aumentou extraordinariamente. De acordo com CONAB (2018), na safra de 1976/77 a produção era de 19.255,7 milhões de toneladas já na safra de 2016/17 atingido 97.817,1 milhões de toneladas. Esse aumento significativo está associado ao aumento da produção de aves e suínos nestes anos. O estado do Mato Grosso se destaca na produção do país, sendo o maior produtor brasileiro. Mato Grosso juntamente com os estados do Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul e Minas Gerais produziram 74,2% do total da safra nacional de 2017/18 (CONTINI et al., 2019).

Já quando se trata da importância econômica do milho em Portugal, no ano de 2018 o país apresentou valores de produção de milho grão de 713.860 toneladas, com base em uma área cultivada de 83.356 ha, e uma produção de milho forrageiro de 2.419.780 toneladas, em 63.799 ha cultivados (INE, 2018).

3.1.4 O milho como planta forrageira

O milho possui uma alta aptidão para a alimentação animal como planta forrageira, sendo na maioria das vezes utilizada na forma de silagem. De acordo com INE (2018) a área de milho cultivada como forragem em Portugal em 2017 foi de 63.799 ha, obtendo 2.419.780 milhões de toneladas de forragem.

Para a obtenção das características de qualidade alimentar animal que esta planta proporciona devem ter-se cuidados culturais diversos, desde a sementeira até ao momento ideal do corte da planta, pois estes influenciam diretamente no processo de fermentação da planta no silo (SANTOS, 2012). De acordo com Zapollatto (2007) deve-se levar em consideração a escolha de cultivares modernas, sendo estas mais produtivas e adaptadas a condições ambientais diversas. Segundo Barros e Calado (2014), o milho apresenta qualidades nutricionais excelentes por possuir praticamente todos os aminoácidos.

O milho é uma planta C4 e a espécie mais utilizada para fazer ensilagem, uma vez que produz uma grande quantidade de massa seca e detém características bromatológicas que apresentam os requisitos para a produção de uma silagem de qualidade, sendo eles: matéria seca adequada no momento do corte; teor de carboidratos solúveis superiores a 3%; facilidade de fermentação microbiana; e baixo poder tampão (ZAPOLLATTO, 2007). Destaca-se ainda outro fator que facilita a utilização do milho para alimentação animal, como sendo a facilidade de colheita mecânica (SANTOS, 2012).

As recomendações de adubação para o milho grão e para o milho silagem são distintas, uma vez que no milho silagem corta-se todo o material (grãos e parte vegetativa) que é retirado do campo no fim do ciclo da cultura. Sendo assim em milho silagem os nutrientes são removidos em maior quantidade (COELHO, 2006).

3.2 Gestão do fósforo nos solos agrícolas

3.2.1 Fósforo nas plantas

O fósforo exerce diversas funções na planta, sendo vital para o seu bom crescimento e desenvolvimento desde a germinação da semente (FAQUIN, 2005). Nas plantas o P é encontrado em formas orgânicas e inorgânicas, sendo que na forma inorgânica (Pi) aparece como ortofosfato e em menor quantidade como pirofosfato. Em conjunto apresentam alta relação ao P total encontrado nos tecidos. Suas formas na planta são compostos resultantes da esterificação do ortofosfato a açúcares e álcoois, ou pirofosfato ligados a outro grupo fosfato. A adenosina trifosfato (ATP) é um importante composto no qual o grupo fosfato é responsável por armazenar a energia utilizada nos processos endergônicos do metabolismo, essencial para a síntese de compostos orgânicos, tais como o amido, as proteínas e as gorduras (FAQUIN, 2005).

Sendo essencial no metabolismo geral das plantas, o P é fundamental para a germinação de sementes, sendo que nas sementes o P se armazena na forma de fitatos. Nos estádios iniciais de desenvolvimento das plantas, o P é essencial para a formação de fosfolípidos dos ácidos nucleicos e das membranas celulares. Os fitatos vão se degradando com o passar do tempo e os níveis de P no DNA e RNA aumentam, do que resulta aumento na síntese das proteínas e na divisão celular. O vacúolo é o local de acúmulo do Pi, quando ocorre aumento na troca do Pi do vacúolo resultará numa intensificação da respiração e isso poderá retardar o amadurecimento dos frutos (FAQUIN, 2005).

A absorção de P pelas plantas ocorre basicamente pelo sistema radicular e sua disponibilidade para as plantas vai depender de um dinamismo que envolve as suas diferentes formas de P no solo, definindo assim a capacidade de dessorção e absorção pelas plantas (GATIBONI, 2003).

Como o P nas plantas é bastante móvel, os sintomas de deficiência iniciam nas folhas mais velhas, sendo os mais frequentes: menor crescimento da planta; e no caso do milho tons verde-azulado ou arroxeados nas folhas (FAQUIN, 2005).

3.2.2 Fósforo no solo e biodisponibilidade para as plantas

O P é caracterizado como sendo um elemento pouco móvel no solo, dificultando assim a sua absorção pelas plantas (TIECHER, 2011). O P é encontrado no solo em diferentes frações, sendo estas de difícil identificação, devido ao grande número de reações que o P pode sofrer e de seus compostos resultantes (GATIBONI, 2003). Contudo, dependendo da natureza do material em que o nutriente está ligado, ele pode ser separado em P orgânico (Po) e P inorgânico (Pi). Os compartimentos de P inorgânico e orgânico ligados aos colóides e matéria orgânica ambos apresentam formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis (GATIBONI et al., 2013).

O Pi pode ser dividido em dois grupos: o P encontrado no interior dos minerais primários; e o P adsorvido ou precipitado na fração coloidal do solo. O último pode ser encontrado na solução do solo ligado ao ferro (Fe), alumínio (Al) e cálcio (Ca), e principalmente adsorvido a oxihidróxidos de Fe e Al. Com isso, em solos onde o pH está abaixo de 5,0, o P é encontrado nos minerais que contém Fe e Al, já em solos com pH acima de 5,0 ocorre nos minerais que contém Ca. Portanto, quando os fosfatos solúveis são adicionados ao solo, a água entra no grânulo, e libera-se fosfato monocálcico, fosfato dicálcico e ácido fosfórico (essas duas últimas formas em menores quantidades). Estas formas acidificam o solo e estabilizam o pH em média em um valor 1,5 mais baixo, o que solubiliza os hidróxidos de Fe Al em torno do grânulo o que provoca a adsorção do fosfato.

O Pi pode ser encontrado no solo em várias formas e com diferentes ligações, ditadas pelo grau de intemperização do solo, uma vez que quanto mais intemperizado mais baixa é a disponibilidade de P no solo (GATIBONI et al., 2013).

O P orgânico é originário dos resíduos orgânicos que são adicionados ao solo, como palhadas, por exemplo, bem como da biomassa microbiana e dos produtos de decomposição. A fração Po é separada em dois subgrupos: o P que está contido na biomassa microbiana, representando a menor parte do Po (<10%); e o P que vem dos resíduos e da matéria orgânica, sendo esta a maior fração. Os principais grupos de Po do subgrupo da matéria orgânica são os

fosfatos mono e diésteres, os fosfatados e os anidros do ácido fosfórico, sendo os mais abundantes os fosfatos monoésteres (GATIBONI et al., 2013).

Independente da forma do P no solo, a sua avaliação e correlação com produtividade de plantas se dá por meio da avaliação do P disponível, tendo vários extratores químicos para isso. O método Mehlich é o dos mais utilizados, embora, este extrator não consiga extrair P com precisão em solos com alto teor de argila (CQFS-RS/SC, 2016).

Assim, deve-se estudar em maior profundidade a dinâmica do P no solo. O fracionamento é uma dessas ferramentas e baseia-se em uma sequência de extratores químicos com escala crescente de reatividade, as quais geram a extração de formas de P orgânico e P inorgânico lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis.

3.2.3 Adubação fosfatada e meio ambiente

O uso excessivo de fertilizantes fosfatados pode ocasionar o enriquecimento das águas com P, embora este não seja um problema direto para a saúde humana e sanidade animal. Podem, contudo, ocorrer problemas ambientais, devido ao desequilíbrio dos ecossistemas aquáticos pelo enriquecimento em P das águas levando a um processo chamado de eutrofização. Este processo de enriquecimento excessivo das águas beneficia a proliferação de algas e plantas aquáticas, prejudicando a utilização da água e gerando consequências que alteram o ambiente de meio aquático. Após fase exuberante de crescimento, as algas entram em decomposição e a respiração dos seus tecidos pelos microrganismos pode originar redução da disponibilidade de oxigênio e no limite levar à morte dos peixes (RESENDE, 2002).

Segundo Tiecher (2011), devem ser desenvolvidos mecanismos que mesmo quando reduzidas as demandas de adubação fosfatada as culturas mantenham ou até mesmo aumentem seu patamar de produtividade. Têm-se algumas medidas que podem e devem ser adotadas para controlar/amenizar este processo. Elas são a correta dosagem de adubação consorciadas com

práticas de conservação de solos, destacando-se o sistema de plantio direto (SPD) para controle da erosão (RESENDE, 2002).

3.3 Condicionadores do solo e biodisponibilidade de fósforo

3.3.1 Biochar

O biochar é um condicionador do solo que pode melhorar a sua qualidade, reduzindo a disponibilidade de algumas impurezas poluentes e a lixiviação de nutrientes e melhorar o armazenamento de carbono no solo (NOVOTNY, 2015). Com isso, algumas propriedades do solo melhoram e este fornece melhores condições para o desenvolvimento das culturas, resultando no aumento de produção. De acordo com Petter et al. (2016), além do papel do biochar no aumento da fertilidade dos solos, deve ser destacada a sua importância ambiental pelo sequestro de CO₂ atmosférico.

O biochar é produzido a partir de biomassa residual de diversos materiais, que são submetidos a um processo de decomposição térmica em uma atmosfera de oxigênio esgotado e numa ampla faixa de temperatura, processo conhecido como pirólise.

A pirólise pode ser lenta, rápida e instantânea. Porém para a produção de biochar, a pirólise lenta é a que apresenta melhores resultados. Nesta temperatura fica em torno de 300 a 600 °C e por um longo período, sendo este um dos principais fatores que leva o biochar a ser altamente funcional, uma vez que a degradação incompleta e a drenagem insuficiente do alcatrão preservam parte da estrutura original de carboidratos e fenóis e com isso mantém-se alto teor de grupos hidroxila e carboxila, aumentando a capacidade de troca catiônica do solo após aplicação deste condicionador (NOVOTNY, 2015).

O potencial de ação do biochar depende de vários fatores, sendo estes o tipo de pirólise, temperatura, tempo, oxigênio, granulometria e tipo da biomassa utilizada. O resultado obtido da aplicação de biochar depende do tipo de solo e planta a ser cultivada, sendo também as doses recomendadas deste condicionador variáveis em função do solo e das culturas (PETTER et al., 2016).

O biochar pode ser feito a partir de distintas biomassas normalmente com resíduos oriundos, por exemplo, de casca de arroz, serragem e várias outros resíduos orgânicos (PETTER et al., 2016).

Diversos estudos têm sido realizados com biochar oriundo de distintas biomassas. Vilela (2017) relatou resultados positivos com biochar feito a partir da *Magonia pubescens*, uma planta típica do cerrado brasileiro, onde este apresentou excelente capacidade de retenção de água e de troca catiônica, bem como capacidade de diminuir a lixiviação de nutrientes, melhorando consideravelmente os atributos físicos e químicos do solo. Costa (2018) apresentou resultados satisfatórios com biochar feito a partir da biomassa de bagaço da cana-de-açúcar, onde este condicionador apresentou alternativa de substituição completa de insumos químicos na produção de melancia.

Destaca-se que o uso de biochar produzido a partir da biomassa de bambu aumentou a eficiência agrônômica do fosfato natural e aumentou também a disponibilidade do P no solo independentemente da fonte de P que tenha sido utilizada (OLIVEIRA, 2012).

3.3.2 Zeólitos

Os zeólitos são minerais pertencentes a um grupo de aluminossilicatos cristalinos, que provêm de uma rede de poliedros com tetraedros do tipo $[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$ e que estão ligados por oxigênios comuns. No mercado podem-se encontrar zeólitos naturais ou zeólitos sintéticos. A indústria se direciona principalmente para os zeólitos sintéticos, pelo fato destes serem mais homogêneos nas suas propriedades químicas e também pelo fato de os naturais apresentarem muitas impurezas. A indústria tem vindo a aperfeiçoar os zeólitos sintéticos visando às especificidades de diferentes usos (BRAGA e MORGON, 2007).

Como condicionadores agrícolas são utilizados os zeólitos naturais, podendo ser aplicadas in natura ou com poucos processos de beneficiamento. Estes apresentam também menor custo e se tornam mais rentáveis com boa relação custo-benefício (RESENDE et al., 2008).

Os zeólitos são considerados condicionadores do solo por possuírem alta capacidade de troca catiônica, o que resulta em maior facilidade de reter nutrientes, maior retenção de água no solo, melhor aeração do solo, redução da lixiviação de nutrientes e com isso maior economia de fertilizantes e menor risco de contaminação ambiental e maior capacidade de adsorção de metais pesados no solo (RESENDE et al., 2008).

Resende et al. (2008) consideram que os zeólitos têm papel ambiental pelo fato de apresentarem capacidade de recuperar áreas degradadas por possíveis derrames de petróleo, óleo e gasolina. Podem reter metais pesados encontrados no solo ou em águas contaminadas e reduzir a lixiviação de nutrientes que podem causar grande impacto ambiental, como o fósforo que, quando aplicado em excesso, pode contaminar o lençol freático gerando eutrofização das águas.

Bernardi et al. (2005) realizaram estudo com zeólitos aplicados ao solo cultivado com alface. Os autores concluíram que o uso deste condicionador favoreceu de maneira eficiente a absorção dos nutrientes N, P e K. Por outro lado, a alface cultivada com zeólitos apresentou maior produção e observaram-se correlações significativas com os teores de P na parte aérea.

Quando se trata do nutriente P, o uso de zeólitos ganha destaque, uma vez que se sabe da necessidade da adubação fosfatada em algumas regiões do globo para a obtenção de uma boa produção. Atualmente o uso de zeólitos modificados com rocha fosfática tem sido muito utilizado visando numa melhor liberação de P para as plantas (BERNARDI et al., 2008).

3.4 Fertilização fosfatada no milho

O milho, tal como a generalidade das culturas, absorve e necessita em maior quantidade dos macronutrientes N, P e K, não sendo dispensáveis também os macronutrientes considerados secundários, como o cálcio, o magnésio e o enxofre, e também os micronutrientes (BARROS e CALADO, 2014).

Na planta o P é responsável por exercer funções de suma importância, tais como o fato deste ser indispensável para o seu metabolismo, por ser

essencial na transferência de energia da célula, bem como na fotossíntese e respiração, sendo também elemento estrutural de várias coenzimas, fosfolipídios, fosfoproteínas e ácidos nucleicos de genes e de cromossomos (GRANT et al., 2001).

Os sintomas característicos da deficiência de P na planta são um porte menor, coloração arroxeada nas folhas mais velhas primeiramente e posteriormente passando já para uma necrose que começa na ponta e segue para a base das folhas (FERREIRA, 2012).

O melhor momento de aplicação de P no milho ocorre juntamente com a sementeira, pois do fósforo total aplicado, a planta só absorve em torno de 20%, os outros 80% ficam indisponíveis, uma vez que este nutriente é praticamente insolúvel e é retido com grande facilidade no solo por mecanismos de precipitação e de adsorção (BARROS e CALADO, 2014; COELHO, 2006).

Quanto às doses de P que se aplicam, estas variam em função de vários fatores como o tipo de solo, uma vez que os teores de P disponíveis variam, bem como a capacidade de adsorção. A produtividade esperada e a maneira como se dá o manejo do solo e das culturas anteriores também influenciam a necessidade de fertilizante fosfatado (PAIVA, 2012). Para o estabelecimento correto de um programa de aplicação de fertilizantes devem realizar-se análises de solo, para juntamente com a produtividade esperada, se obter a dosagem adequada. No caso do milho são exportados cerca de 10 kg de P_2O_5 por tonelada de grão produzida (COELHO, 2006).

3.5 Uso de condicionadores na cultura do milho

No milho, tal como em outras culturas, o objetivo é maximizar a produtividade, com um bom custo-benefício e assegurando a sustentabilidade do sistema de produção. Para que tudo isso possa ocorrer devem fornecer-se à cultura as melhores condições de desenvolvimento. A fertilidade do solo é um aspecto importante e cada vez mais os produtores rurais estão em busca de novas tecnologias que possam agregar resultados positivos, sendo que os condicionadores do solo são um fator de produção a ter em conta.

Os condicionadores são produtos que visam melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos, sendo oriundos de diferentes materiais e métodos de fabricação (OLIVEIRA et al., 2015). Eles podem melhorar a ciclagem e aproveitamento dos nutrientes no solo. Barboza (2015) comprovou que o uso de condicionadores em anos em que a precipitação estava a baixo da média resultou em maiores produtividades, ou seja, os condicionadores auxiliaram na retenção de água no solo.

Muitos estudos tem comprovado o impacto positivo do uso de alguns condicionadores na cultura do milho. Moreira (2018) evidenciou que o uso de condicionador no solo (zeólita), proporcionou aumento significativo de massa seca, maior altura e diâmetro do colmo no milho e também os teores de Ca, Mg, N, P, K e Zn.

Arruda (2016) verificou que o uso de condicionador (cinza de biomassa), levou ao aumento do número de folhas, elevou o teor de clorofila e de nutrientes em diversas espécies de plantas dentre elas o milho. O autor verificou também que o condicionador elevou o pH do solo e estimulou a atividade biológica, o que terá proporcionado uma melhor decomposição da matéria orgânica. Gomes (2007) relatou que o uso de condicionador no solo (lodo de esgoto) aumentou consideravelmente a produção final de grãos, resultando na máxima eficiência agrônômica na produção de milho.

No caso do uso de biochar, Farias (2018) verificou que o produto proporcionou aumento significativo na colonização micorrizica das raízes do milho, bem como da biomassa microbiana do solo.

De uma maneira geral, o uso de condicionadores de solo de diferentes naturezas tem originado resultados positivos nas propriedades do solo e no desenvolvimento e produtividade das culturas.

4. Materiais e métodos

4.1 Caracterização dos locais

No âmbito deste trabalho foram conduzidos dois experimentos, um a campo na Quinta do Paulão, que está localizado nas coordenadas 41°46'43" Latitude Norte, 6°47'56" Longitude Oeste e altitude de 750 m, e outro em vasos, colocado nas coordenadas 41°47'48,46" Latitude Norte, 6°45'43,25" Longitude Oeste e altitude de 674 m nas dependências das estufas pertencentes ao Instituto Politécnico de Bragança (IPB), conforme mostra a figura 1, ambos os locais situados em Bragança, no Nordeste de Portugal.



Figura 1. Imagens dos ensaios, Quinta do Poulão (A) e estufas (B).

4.1.1 Clima

O clima em ambos os locais é classificado como sendo Csb (clima temperado com verão seco) de acordo com a classificação de Köppen-Geiger. A precipitação e as temperaturas médias mensais registadas durante o período experimental encontram-se na figura 2.

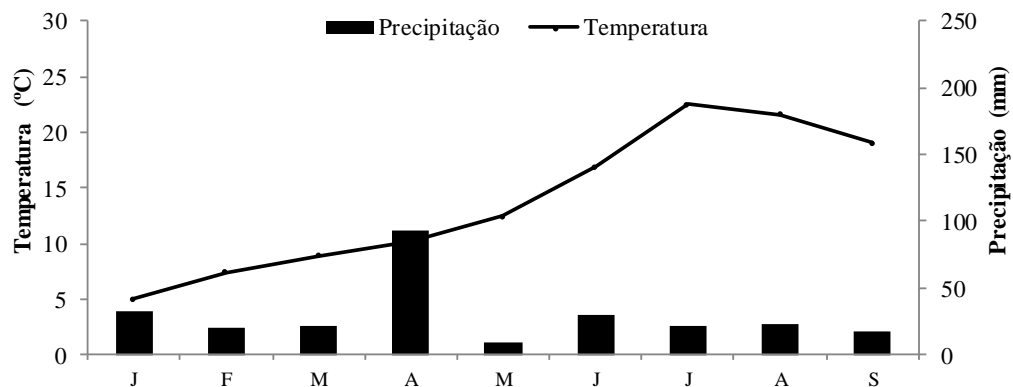


Figura 2. Precipitação e temperatura média mensais registadas na estação meteorológica da Quinta de Santa Apolónia durante o período experimental, 2019.

4.1.2. Solo e condicionadores

Os solos utilizados nos experimentos são distintos (Tabela 1). De acordo com as suas características químicas, o solo da Quinta do Poulão é classificado como Fluvissole êutrico (WRB 2015) e apresenta textura franca, com 21% de argila, 25% de silte e 54% de areia.

O solo usado no experimento em vasos é classificado como sendo Regossolo êutrico com origem coluvial (WRB 2015) e apresenta textura franco-limosa. Nos vasos foi utilizado solo de uma coleta efetuada na profundidade de 0-20 cm, após ter sido crivado em malha de 4 cm.

Utilizaram-se os condicionadores Biochar, obtido de biomassa de lenha de poda de acácia, e Zeólitos, um mineral aluminossilicato hidratado, ambos caracterizados na Tabela 2.

Tabela 1. Propriedades do solo antes da instalação dos ensaios nos vasos e na Quinta Stª Apolónia.

Propriedades	Vasos	Stª Apolónia	Propriedades	Vasos	Stª Apolónia
pH H ₂ O	6,54	5,54	K (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,25	0,20
pH KCl	5,31	4,64	Na (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,77	0,21
M O (%)	1,20	2,17	AT (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,00	0,23
N (g kg ⁻¹) ⁵	-	1,17	Al (cmol kg ⁻¹) ⁴	0,00	0,03
P ₂ O ₅ (mg kg ⁻¹) ²	15,97	26,00	Ca (cmol kg ⁻¹) ⁴	9,08	10,93
K ₂ O (mg kg ⁻¹) ²	78,00	63,00	Mg (cmol kg ⁻¹) ⁴	4,45	6,03
Boro (mg kg ⁻¹) ³	0,61	0,47	CTCe (cmol kg ⁻¹) ⁴	14,55	17,61

¹Matéria Orgânica, Walkley-Black; ²Egner-Rhiem; ³Azometina-H; ⁴Acetato de amónio pH 7,0; ⁵Kjedahl.

Tabela 2. Principais características dos condicionadores de solo utilizados neste estudo (Ecochar e Fertcel 2017).

Zeólitos		Biochar	
SiO ₂ (%)	63,0	Carbono Orgânico Total (%)	90,0
TiO ₂ (%)	0,45	Cinzas (%)	5,00
Al ₂ O ₃ (%)	11,6	Umidade (%)	30,0
Fe ₂ O ₃ (%)	1,81	Nitrogênio total (%)	0,50
FeO (%)	0,81	Voláteis (%)	5,00
MgO (%)	0,92	Cádmio (mg kg ⁻¹)	0,05
CaO (%)	5,78	Chumbo (mg kg ⁻¹)	0,05
Na ₂ O (%)	2,39	Ferro (mg kg ⁻¹)	99,5
K ₂ O (%)	1,49	Arsênio (mg kg ⁻¹)	0,10
P ₂ O ₅ (%)	0,09	Mercúrio (mg kg ⁻¹)	0,10
H ₂ O (%)	3,44	Condutividade (μS/cm)	948
Peso específico (g/cm ³)	2,10	TMT ² (col./g)	1.0*10 ^{^1}
DAP ¹ (g/cm ³)	0,98	DAP ¹ (kg/m ³)	350
pH	7,60	pH	9,00

4.2. Delineamentos experimentais

4.2.1. Experimento a campo

No campo, o experimento foi conduzido em delineamento fatorial completo com dois fatores, condicionadores e doses de fósforo. Como condicionadores foram incluídos Biochar e Zeólitos aplicados individualmente e conjugados com Adubação Mineral. Foram usadas quatro doses de fósforo, sendo estas 0, 50, 100 e 200 kg (P₂O₅) ha⁻¹ fornecidas pelo adubo superfosfato de cálcio 18% P₂O₅. De cada combinação de fatores incluíram-se três repetições. Cada parcela do experimento apresentou uma área de 5 × 4 m.

4.2.2. Experimento em vasos

O experimento em vasos foi composto de seis tratamentos em delineamento experimental completamente casualizado, sendo estes Controle, Biochar, Biochar + Fósforo mineral, Zeólitos, Zeólitos + Fósforo mineral e Fósforo mineral. De cada tratamento incluíram-se quatro repetições, totalizando assim 24 vasos. Os vasos continham uma quantidade de 8 kg de solo.

4.3. Instalação e manutenção dos ensaios

4.3.1. Experimento a campo

O experimento a campo foi instalado posteriormente a um preparo do solo, sendo este uma mobilização com charrua de aivecas para incorporar a vegetação espontânea e realizar juntamente a sua descompactação. Demarcou-se a área total e posteriormente cada parcela. De seguida efetuou-se a aplicação dos fertilizantes e condicionadores. Para tal utilizaram-se os fertilizantes conhecidos comercialmente como Ecochar, Fertcel e Super 18. O biochar foi usado numa dose correspondente à aplicação de 10 t ha^{-1} . A dose correspondente para os zeólitos foi de 5 t ha^{-1} . A adubação parcelada de nitrogênio na forma de nitrato de amônio 27% N (50 e 100 kg N ha^{-1} em fundo e cobertura, respetivamente, e potássio ($150 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$) na forma de cloreto de potássio (60% KCl) foi realizada em todas as parcelas. A aplicação de nitrogênio foi realizada de forma fracionada sendo primeiramente a de fundo no mesmo dia da sementeira e constituiu na aplicação de metade da dose total do fertilizante, e a de cobertura que foi realizada aproximadamente um mês após a sementeira e constituiu na outra metade do fertilizante.

No dia 22 de maio de 2019, semeou-se o milho sendo este o híbrido Monero, de ciclo tipo FAO 500, com um espaçamento de $0,7 \times 0,18 \text{ m}$, totalizando uma densidade de plantas de 80000 plantas por hectare.

As aplicações de agroquímicos durante o ciclo da cultura foram designadamente um herbicida de absorção foliar em pós-emergência, produto comercial Laudis, o qual foi aplicado na concentração de $0,5 \text{ L hL}^{-1}$ e na dose de 2 L ha^{-1} , quando as plantas se encontravam no estado fenológico de 4 a 6 folhas.

A regadia da cultura era realizada na ausência de precipitação, numa sequência de uma rega por semana com o pivô central, numa quantidade girando na média de 40 mm, com total aproximado de 400 mm durante o período de crescimento.

O milho foi colhido no mês de setembro, uma vez que o objetivo era para milho silagem.

4.3.2. Experimento em vasos

Para instalar o milho nos vasos no segundo ano do experimento, os trabalhos iniciaram-se com a descompactação do solo. O solo dos vasos era vertido para um recipiente de boca larga, destorreado com uma pá de jardinagem e recolocado nos vasos. Feito isso realizou-se adubação sendo esta composta de nitrogênio, onde para cada vaso de 8 kg de solo, foram aplicadas de 7,4 g de nitrogênio, sendo o fertilizante utilizado nitrato de amônio (27% N, 50% NH_4^+ , 50% NO_3^-). Para fósforo foram utilizadas 11,1 g por vaso do fertilizante superfosfato 18% (18% P_2O_5). Além disso os vasos receberam 1,6 g de K_2O . Já para os condicionadores estes foram aplicados no primeiro ano de estudo sendo que a quantidade que foi utilizada foi de 35,7 g por vaso de biochar e no caso dos zeólitos a quantidade usada foi de 17,8 g por vaso.

Para assegurar umidade para a germinação das sementes, foi adicionada água até à saturação. Passadas 24 horas, procedeu-se a mobilização superficial do solo dos vasos com um objeto metálico pontiagudo e colocaram-se quatro sementes por vaso a 3 a 4 cm de profundidade. Os pratos de recuperação de água de rega sobre os quais habitualmente se colocam os vasos foram colocados de forma invertida sobre a boca dos vasos para reduzir a evaporação e assegurar umidade ao processo de germinação. Ao quarto dia os pratos foram colocados de novo debaixo dos vasos para evitar estiolamento das plantas germinadas. Após germinação, as plantas em excesso foram removidas de forma progressiva, ficando apenas uma planta com aspeto saudável por vaso. No experimento foi utilizado o híbrido Monero. A semeadura ocorreu no dia 29 de maio de 2019.

As quantidades de água de rega aplicadas durante a estação de crescimento foram decididas de acordo com o estado aparente do solo e das plantas, sendo o intervalo de regas ajustado. Em experimentos deste género alguns tratamentos originam maior desenvolvimento das plantas o que faz variar as suas necessidades hídricas. Assim, como a rega não era fator em estudo, procurou manter-se os vasos com boa umidade para que a rega não tivesse qualquer efeito no desenvolvimento das plantas. O intervalo de tempo entre regas também foi muito variável ao longo do tempo, dependendo do

estádio de desenvolvimento das plantas e das condições ambientais externas. Em algumas fases do ciclo chegaram a fazer-se regas diárias.

4.4. Colheita de amostras e análises laboratoriais

4.4.1. Experimento a campo

A campo coletaram-se folhas jovens com o limbo totalmente expandido quando o milho se encontrava no estágio V7, para monitorização do estado nutricional. As amostras foram conduzidas ao laboratório onde foram secas em estufa de ventilação forçada regulada a 65 °C. Essas amostras foram posteriormente moídas para posterior análise da composição elementar.

Na colheita, que foi realizada em setembro de 2019, foram tomadas amostras de plantas de 1 m linear. As amostras inteiras foram pesadas frescas em campo. Em seguida foram tomadas subamostras representativas da biomassa total e conduzidas a laboratório. Essas subamostras foram pesadas em fresco e colocadas em estufa de ventilação forçada regulada a 65 °C até peso constante. Após secagem foram de novo pesadas para cálculo da percentagem de matéria seca, informação a partir da qual se pode expressar a produção de campo em matéria seca por ha a fim de comparar os diferentes tratamentos. A biomassa seca das subamostras foi também moída para análise elementar.

4.4.2. Experimento em vasos

A colheita do milho efetuou-se no dia 06 de agosto de 2019. As plantas mostravam sintomas de senescência das folhas basais e paragem de crescimento provavelmente pela forte redução da disponibilidade de alguns nutrientes importantes nos vasos. As plantas de cada um dos vasos foram cortadas pela base, junto ao solo, e colocadas na estufa a 65 °C. Tal como as amostras de campo, foram depois moídas para posterior análise à composição elementar.

O solo dos vasos foi também coletado para posterior análise. O solo de cada um dos vasos foi descompactado e homogeneizado e tomada uma amostra de 500 g. Estas amostras foram secas em estufa de ventilação forçada regulada a 40 °C e crivadas em malha de 2 mm.

4.4.3. Análises de tecidos vegetais

Amostras de tecidos vegetais provenientes do campo e dos vasos foram moídas num moinho Cyclotec 1030 FOSS com malha de 1 mm. Após a moagem das amostras procedeu-se à determinação da concentração de nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, boro, cobre, ferro, zinco e manganês nos tecidos das plantas.

O nitrogênio foi determinado seguindo o método N Kjeldahl, que se inicia com a digestão da amostra convertendo o nitrogênio orgânico em nitrogênio mineral (N-NH_4^+). Para tal pesou-se 1 g de cada amostra para tubos de digestão e adicionaram-se 15 ml de ácido sulfúrico concentrado juntamente com duas pastilhas de catalisador de selênio. Feito isso, as amostras foram levadas ao bloco digestor a uma temperatura de 400 °C durante 70 minutos. No final da digestão e após arrefecimento dos tubos os mesmos foram levados para o destilador Kjeltec TM 8400 Autoanalyser FOSS. O processo de destilação se deu com hidróxido de sódio, passando a amônia formada numa corrente de vapor, e titulada com ácido clorídrico em solução de ácido bórico receptora (BREMNER, 1996).

Para as análises de fósforo, potássio, cálcio, magnésio, ferro, cobre, zinco e manganês pesaram-se 0,25 g de amostra para um tubo próprio do aparelho micro-ondas CEM MARS XPRESS. As amostras foram digeridas após adição de 10 ml de ácido nítrico durante 30 minutos. Após a digestão aferiu-se as amostras para 50 ml de H_2O destilada. Nesta solução quantificaram-se os nutrientes fósforo, potássio, cálcio, magnésio, ferro, cobre, zinco e manganês. O fósforo foi determinado pelo método azul de molibdato e ácido ascórbico como agente redutor no aparelho espectrofotômetro GENESYS no comprimento de onda de 882 nm. O potássio foi quantificado pelo método de espectrofotometria de chama no aparelho UNICAM PU 9100X. E os demais

nutrientes foram quantificados pelo método de espectrofotometria de absorção atômica no mesmo equipamento (WALINGA et al., 1997).

Para análise do boro pesou-se primeiramente 1 g de amostra para um recipiente apropriado- Adicionou-se 0,10 g óxido de cálcio e homogeneizou-se a amostra com auxílio de espátula. Em seguida, as amostras devidamente preparadas foram levadas a mufla a uma temperatura de 500 °C durante 90 minutos para a queima das mesmas. Posteriormente ao arrefecimento adicionou-se 10 ml de ácido sulfúrico 0,5 M e após 30 minutos realizou-se a filtragem das amostras. Desta alíquota pipetou-se 1 ml e adicionou-se a solução tampão e azometina-H (solução de mudança de cor), homogeneizou-se e após 30 minutos realizou-se a leitura das amostras pelo método do espectrofotômetro 420 nm (WALINGA et al., 1989).

4.4.4. Análises de solos

Os procedimentos analíticos descritos abaixo foram realizados na fração terra fina. A textura do solo foi realizada através do método da pipeta de Robinson (VAN REEUWIJK, 2002).

Para determinação de pH em cloreto de potássio preparou-se uma suspensão de solo e solução de 1M KCl na proporção de 1 para 2,5 (p/v). A mesma foi agitada ocasionalmente no período de 2 horas. Ao fim deste tempo realizou-se a leitura através do uso de um potenciômetro (VAN REEUWIJK, 2002).

Para pH em água foi seguido o procedimento anterior, mas a solução usada foi água destilada (VAN REEUWIJK, 2002).

A matéria orgânica foi determinada pelo método Walkley Black. O mesmo consiste em um processo de digestão úmida da matéria orgânica da amostra de solo em uma mistura de dicromato de potássio e ácido sulfúrico durante o período de 30 minutos.

Para determinar o carbono facilmente oxidável, foi realizada a titulação do dicromato residual com sulfato de ferro amoniacal. O cálculo do teor em matéria orgânica é feito através da multiplicação da percentagem de carbono

pelo fator 1,72, supondo que a matéria orgânica da amostra de solo contém cerca de 58% de carbono (VAN REEUWIJK, 2002).

Para a capacidade de troca de cátion foi percolada uma amostra de solo junto a uma solução de acetato de amônio tamponizada em pH 7, após o período de 30 minutos de contato e agitação. Os cátions Ca e Mg foram mensurados através da absorção atômica e K e Na pelo processo de espectrometria de emissão de chama num equipamento UNICAM PU 9100X (VAN REEUWIJK, 2002).

O boro no solo foi determinado através do método de extração com água quente, utilizando um procedimento colorimétrico com base em azometina-H, um agente complexante de $B(OH)_3$ em meio aquoso (KEREN, 1996).

A determinação de fósforo e potássio foi feita nas suas formas mais solúveis, através de extração com uma combinação de lactato de amônio e ácido acético, solução tamponada em pH 3.7. O fosfato extraído foi determinado colorimetricamente pelo método do azul de molibdato de amônio, com ácido ascórbico como agente redutor (ALMEIDA e BALBINO, 1960).

A avaliação dos íões fosfatados mais biodisponíveis (fósforo lábil) foi feita nas duas primeiras frações do procedimento de Hedley et al. (1982). A primeira extração teve início com a inserção de uma membrana de resina de troca aniônica da marca BDH, com as dimensões de 1 × 2 cm, num tubo de policarbonato com 1 g de solo e 20 ml de água destilada. O tubo é agitado durante 12 horas. A água é decantada e os íões fosfato na resina são extraídos com uma solução de HCl 0,5 M durante 12 horas. O fósforo é quantificado colorimetricamente de acordo com a metodologia apresentada anteriormente e recebe a designação de P-resina. A segunda extração é feita com uma solução de $NaHCO_3$ 0,5 M adicionada na quantidade de 30 ml no solo e o tubo agitado por mais 12 horas. O fósforo é determinado após centrifugação e decantação da solução e recebe a designação de P-bicarbonato. O fósforo lábil é então calculado pela soma das duas frações extraídas de forma sequencial.

A atividade da fosfatase ácida foi mensurada pela metodologia proposta por Alef et al. (1995). Este método consiste, em avaliar a quantidade de p-nitrofenilfosfato que é formado após a incubação das amostras de solo, durante o período de uma hora a uma temperatura de 37 °C, com p-nitrofenilfosfato, na presença de tolueno e um tampão universal. O filtrado das

amostras e respectivos controles são lidos, com o auxílio de um espectrofotômetro com comprimento de onda 420 nm. Faz-se então a correção dos valores das amostras com os controles e os resultados são expressos em mg de p-nitrofenol por kg de solo seco, por hora (mg p-nitrofenol g⁻¹ h⁻¹).

4.4.5. Determinação da intensidade da cor verde e da fluorescência das clorofilas

Realizou-se a leitura de três índices no experimento a campo e em vasos, com distintos aparelhos portáteis sendo estes o SPAD 502 (Soil Plant Analysis Development), que estima o teor de clorofila nas folhas, o Field Scout CM 1000, que determina um índice NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), e o fluorômetro OS30P+, que determina vários indicadores associados à fluorescência das clorofilas. As medições foram realizadas no mês de julho de 2019 tanto no experimento a campo como no experimento em vasos.

O SPAD 502 mede a transmitância de luz pelas folhas, quantificando a intensidade de coloração verde, ou seja, clorofila. Esta medida se dá através de dois comprimentos de onda, 650 nm que é a luz vermelha absorvida pelos pigmentos de clorofila, e 940 nm que é a luz infravermelha não absorvida pela clorofila, resultando no conteúdo de clorofila das folhas, e a unidade de medida de tal é adimensional.

O NDVI é obtido através da área medida na folha e a quantidade de luz que é refletida nesta mesma área, sendo o cálculo $[(\% \text{Infravermelho próximo} - \% \text{Vermelho}) / (\% \text{Infravermelho próximo} + \% \text{Vermelho})]$. O aparelho contém um gatilho que quando ativado faz com que o aparelho emita os lasers de segmentação, com isso calcula-se os valores NDVI. Essas leituras foram feitas direcionando o aparelho para o limbo das folhas que se encontravam totalmente expandidas, sendo realizada em ângulos de 90 graus relativamente ao limbo das folhas.

Foi ainda usado o fluorômetro portátil OS-30p+. Este equipamento permite determinar a fluorescência da clorofila *a* e a fluorescência transiente através dos protocolos adaptados ao escuro F_V/F_M , F_V/F_0 e o teste OJIP avançado. F_M , F_0 e F_V , são, respetivamente, fluorescência máxima, mínima e

variável de folhas adaptadas ao escuro, e $F_V/F_M = (F_M - F_0)/F_M$ and $F_V/F_0 = (F_M - F_0)/F_0$. O teste OJIP fornece a fluorescência de base a 20 μ s (O), a fluorescência a 2 ms (J), a fluorescência a 30 ms (I) e a fluorescência máxima (FM). O fluorómetro permite uma variada gama de testes com elevada capacidade de detectar e medir estresses na planta capazes de afetar o fotossistema II.

4.5. Tratamento de dados

Os dados foram tabulados e analisados quanto a homogeneidade de variância pelo teste de Barlett e normalidade através do teste de Lilliefors. Sob essas premissas, os dados foram analisados quanto a variância (ANOVA) pelo teste F a 5% ($p < 0,05$). Quando apresentavam diferenças significativas ($\alpha < 0,05$) os valores das médias foram separados pelo teste de comparação múltipla de médias Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

5. Resultados

5.1. Experimento em vasos

A seguir apresentam-se os resultados das análises realizadas com os materiais provenientes do experimento em vasos, sendo estes a determinação da fluorescência das clorofilas, intensidade da cor verde, matéria seca produzida e concentração de N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca, bem como algumas propriedades do solo, como matéria orgânica, pH, P, K e B extraíveis, complexo de troca, os metais micronutrientes Cu, Zn, Fe e Mn e P lábil.

5.1.1. Avaliações fisiológicas

Nas tabelas 3 e 4 apresentam-se os resultados da fluorescência das clorofilas e indicadores da intensidade de cor verde, respectivamente. Os parâmetros OJIP, F_V/F_M e F_V/F_0 não variaram de forma significativa com os tratamentos fertilizantes. Os valores NDVI variaram de forma significativa entre tratamentos, tendo os valores mais elevados sido registrados no tratamento Zeólitos + fósforo (71,3) e os mais baixos no tratamento Zeólitos (64,0). Os valores SPAD não diferiram de forma significativa entre tratamentos.

Tabela 3. Fluorescência das clorofilas em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	O	J	I	P	FV/FM	FV/FO
Controle	251,7 a	327,3 a	412,0 a	498,7 a	0,692 a	2259 a
Biochar	263,0 a	348,0 a	467,0 a	572,0 a	0,712 a	2526 a
Zeólitos	275,3 a	354,3 a	470,3 a	571,0 a	0,714 a	2507 a
Biochar + Fósforo	257,7 a	325,3 a	427,7 a	518,7 a	0,686 a	2203 a
Zeólitos + Fósforo	279,0 a	358,3 a	508,7 a	619,0 a	0,723 a	2640 a
Fósforo	301,7 a	360,3 a	498,3 a	640,7 a	0,698 a	2405 a
Probabilidade	0,0551	0,3047	0,3602	0,1839	0,7603	0,7257

Tabela 4. Leituras de NDVI e SPAD em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	NDVI	SPAD
Controle	69,0 ab	31,9 a
Biochar	64,3 ab	28,5 a
Zeólitos	64,0 b	28,6 a
Biochar + Fósforo	65,3 ab	32,6 a
Zeólitos + Fósforo	71,3 a	31,8 a
Fósforo	69,0 ab	37,6 a
Probabilidade	0,0355	0,1015

5.1.2 Avaliações nas plantas

Na figura 3 apresentam-se os valores obtidos de matéria seca das plantas dos vasos. Os resultados apresentaram diferenças significativas entre tratamentos, sendo que aqueles que receberam fósforo originaram valores de matéria seca significativamente mais elevados que os que não receberam fósforo. O valor médio mais elevado registou-se no tratamento Biochar + fósforo (23,9 g vaso⁻¹).

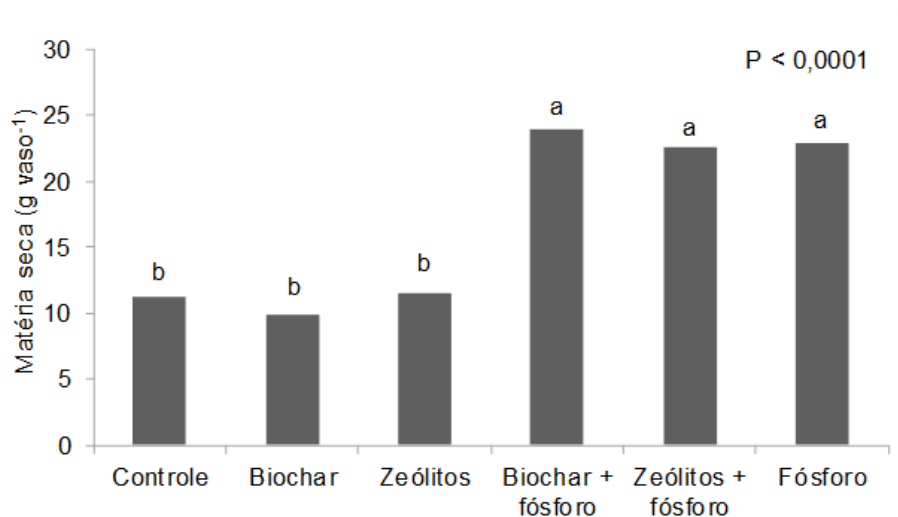


Figura 3. Produção de matéria seca em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Na tabela 5 apresentam-se as concentrações dos macronutrientes N, P, K, Ca e Mg e na tabela 6 as concentrações dos micronutrientes B, Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca das plantas de milho cultivadas nos vasos.

Para N os valores médios não apresentaram diferenças estatísticas entre tratamentos, variando os valores entre 5,86 e 7,27 mg kg⁻¹. Para a concentração de P nos tecidos, o tratamento zeólitos + fósforo apresenta valores significativamente mais elevados (3,18 mg kg⁻¹) que os tratamentos controle (2,58 mg kg⁻¹) e biochar + fósforo (2,53 mg kg⁻¹), porém não apresenta diferenças significativas para com os demais tratamentos. Os resultados obtidos para as concentrações nos tecidos de K não revelaram diferença significativa entre tratamentos, tendo os valores ficado entre 20,5 e 22,8 mg kg⁻¹. Para o Ca e Mg os resultados também não apresentaram diferenças significativas sendo os valores de 0,76 a 1,01 mg kg⁻¹ e de 1,45 a 1,76 mg kg⁻¹, respectivamente.

Tabela 5. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg na matéria seca das plantas de milho em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	N	P	K	Ca	Mg
	----- mg kg ⁻¹ -----				
Controle	6,31 a	2,58 b	20,5 a	0,76 a	1,61 a
Biochar	6,66 a	2,80 ab	21,6 a	0,82 a	1,69 a
Zeólitos	6,42 a	2,81 ab	22,7 a	0,83 a	1,58 a
Biochar + Fósforo	7,27 a	2,53 b	21,0 a	0,83 a	1,45 a
Zeólitos + Fósforo	5,86 a	3,18 a	22,8 a	1,01 a	1,57 a
Fósforo	7,04 a	2,78 ab	22,8 a	0,92 a	1,76 a
Probabilidade	0,6483	0,0350	0,1517	0,0918	0,1393

Para B os resultados obtidos não apresentaram diferença significativas estando os valores médios entre 8,64 e 10,03 mg kg⁻¹. No caso do Fe os resultados também não apresentaram diferença significativa ficando estes entre 173,9 e 243,0 mg kg⁻¹. Já para o Mn registou-se diferença significativa entre tratamentos sendo os valores mais elevados observados nos tratamentos Biochar (64,4 mg kg⁻¹) e Zeólitos (64,9 mg kg⁻¹) e os mais baixos no tratamento Zeólitos + fósforo (53,7 mg kg⁻¹), porém para os demais tratamentos não se obteve diferença significativa. As concentrações de Zn e Cu nos tecidos não

apresentaram diferença significativa, sendo que os valores ficaram entre 22,1 e 31,5 mg kg⁻¹ para Zn e 7,45 e 8,10 mg kg⁻¹ para Cu.

Tabela 6. Resultado da concentração de micronutrientes B, Fe, Mn, Zn e Cu na matéria seca das plantas de milho cultivadas nos vasos em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	----- mg kg ⁻¹ -----				
Controle	9,15 a	228,5 a	61,2 ab	24,3 a	7,65 a
Biochar	8,64 a	224,4 a	64,4 a	23,2 a	8,10 a
Zeólitos	10,03 a	243,0 a	64,9 a	25,1 a	7,97 a
Biochar + Fósforo	8,40 a	185,7 a	60,4 ab	31,5 a	7,45 a
Zeólitos + Fósforo	9,17 a	202,2 a	53,7 b	22,1 a	7,53 a
Fósforo	8,85 a	173,9 a	57,0 ab	27,2 a	7,68 a
Probabilidade	0,1567	0,0527	0,0119	0,1633	0,8589

Na figura 4 apresentam-se os valores de P recuperado pelas plantas. Tal como na matéria seca registaram-se diferenças significativas entre tratamentos. Os tratamentos que receberam P como fertilizante apresentaram valores significativamente mais elevados que os tratamentos que não receberam P, sendo a média maior a do tratamento Zeólitos + fósforo (70,8 mg vaso⁻¹).

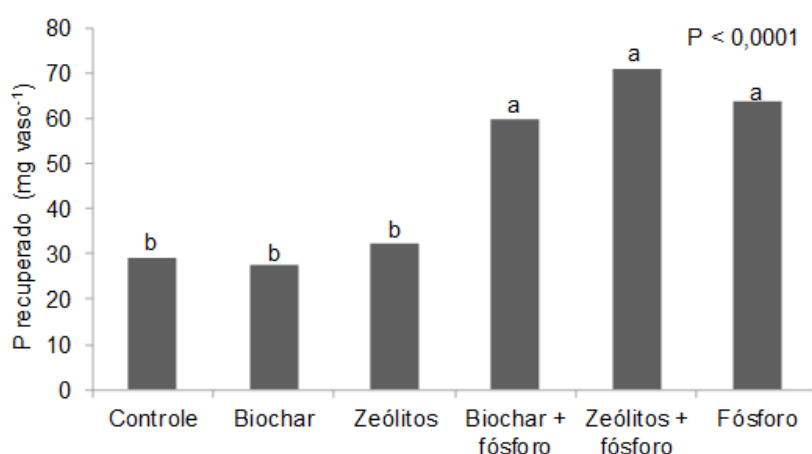


Figura 4. P recuperado em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

5.1.3. Avaliações do solo

Na tabela 7 apresentam-se os resultados da matéria orgânica, pH e P e K extraíveis. Os teores de matéria orgânica não apresentaram diferença significativa, ficando entre 7,18 e 7,66 g kg⁻¹. Já para o pH em H₂O o tratamento Zeólitos apresentou valor médio (6,65) mais elevado que os demais tratamentos (com valores de pH entre 6,42 e 6,47) exceto para o tratamento Biochar (6,54). O pH determinado em KCl não apresentou diferença significativa entre os tratamentos. Os valores de P extraível foram significativamente mais elevados nos tratamentos que receberam P, porém estes tratamentos não diferiram entre si, sendo os valores de 151,3, 157,0 e 169,0 mg kg⁻¹ nos tratamentos Biochar + fósforo, Fósforo e Zeólitos + fósforo, respectivamente. Já nos tratamentos que não receberam P os valores ficaram entre 32,3 e 47,3 mg kg⁻¹. Nos resultados de K extraível os valores obtidos diferiram apenas para com o tratamento controle o qual apresentou o valor médio mais baixo (81,3 mg kg⁻¹), tendo variado nos demais tratamentos entre 90,0 a 94,0 mg kg⁻¹.

Tabela 7. Resultados da matéria orgânica, pH e P e K extraíveis no solo em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	M O	pH do solo		P ₂ O ₅	K ₂ O
	g kg ⁻¹	H ₂ O	KCl	mg kg ⁻¹	
Controle	7,18 a	6,42 b	5,66 a	38,7 b	81,3 b
Biochar	7,21 a	6,54 ab	5,69 a	32,3 b	90,0 a
Zeólitos	7,58 a	6,65 a	5,80 a	47,3 b	93,3 a
Biochar + Fósforo	7,66 a	6,47 b	5,75 a	151,3 a	92,0 a
Zeólitos + Fósforo	7,61 a	6,47 b	5,70 a	169,0 a	93,7 a
Fósforo	7,22 a	6,47 b	5,62 a	157,0 a	94,0 a
Probabilidade	0,0793	0,0021	0,4733	<0,0001	0,0005

Na tabela 8 são apresentados os resultados do complexo de troca. Os valores de Mg²⁺ e Na⁺ não registaram diferenças entre tratamentos. Para Mg²⁺ os valores médios variaram entre 3,62 e 3,90 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹ e os valores de Na⁺ entre 1,28 e 1,48 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹. Os valores de Ca²⁺ variaram significativamente entre tratamentos, sendo os valores médios mais baixos (8,28 cmol⁽⁺⁾ kg⁻¹) e

mais elevados 9,80 ($\text{cmol}^{(+)} \text{kg}^{-1}$) obtidos, respectivamente nos tratamentos Controle e Zeólitos + Fósforo. O tratamento controle registou também os valores mais baixos de K^+ e CTCe.

Tabela 8. Resultados do complexo de troca no solo em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	Complexo de troca				
	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Na^+	CTCe
	$\text{cmol}_{(+)} \text{kg}^{-1}$				
Controle	8,28 d	3,90 a	0,22 b	1,38 a	13,8 c
Biochar	8,80 cd	3,74 a	0,24 ab	1,36 a	14,1 bc
Zeólitos	8,76 cd	3,80 a	0,24 ab	1,28 a	14,1 bc
Biochar + Fósforo	9,65 ab	3,74 a	0,24 ab	1,41 a	15,0 ab
Zeólitos + Fósforo	9,80 a	3,90 a	0,25 a	1,40 a	15,3 a
Fósforo	9,07 bc	3,62 a	0,25 a	1,48 a	14,4 abc
Probabilidade	<0,0001	0,2525	0,0382	0,1132	0,0053

Na tabela 9 apresentam-se os valores de alguns micronutrientes do solo. Para o B o tratamento Controle apresentou valores significativamente mais elevados que o tratamento Fósforo, respectivamente com os valores de 0,67 e 0,36 mg kg^{-1} . Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa estando os valores entre 0,53 e 0,66 mg kg^{-1} . Para o Cu não houve diferença significativa entre os tratamentos. Para o Zn os tratamentos que receberam P apresentaram valores entre 3,15 e 3,34 mg kg^{-1} e tendencialmente superiores aos tratamentos que não receberam P (2,54 e 2,78 mg kg^{-1}). Para o Fe os tratamentos Zeólitos (85,3 mg kg^{-1}), Biochar + fósforo (93,0 mg kg^{-1}), Zeólitos + fósforo (88,6 mg kg^{-1}) e Fósforo (88,9 mg kg^{-1}) não diferiram entre si, porém os tratamentos que receberam P diferiram do tratamento Controle. Para o Mn os resultados encontrados não registaram diferença significativa entre tratamentos.

Tabela 9. Concentração de B, Cu, Zn, Fe e Mn em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Tratamentos	B	Cu	Zn	Fe	Mn
	mg kg ⁻¹				
Controle	0,67 a	46,6 a	2,54 c	77,6 c	103,9 a
Biochar	0,53 ab	49,9 a	2,61 bc	79,9 bc	104,7 a
Zeólitos	0,57 ab	46,4 a	2,78 abc	85,3 abc	108,2 a
Biochar + Fósforo	0,66 ab	51,3 a	3,15 ab	93,0 a	114,4 a
Zeólitos + Fósforo	0,57 ab	50,5 a	3,34 a	88,6 ab	115,3 a
Fósforo	0,36 b	54,9 a	3,30 a	88,9 ab	106,7 a
Probabilidade	0,0469	0,1248	0,0015	0,0026	0,2187

Na figura 5 constam os resultados do P resina e do P bicarbonato, a somatória destes valores é igual ao valor do P lábil no solo. Estes diferiram significativamente apenas quando houve a adição de P e entre os tratamentos com P não houve diferença significativa sendo a maior média a do tratamento Zeólitos + Fósforo com 114,5 mg kg⁻¹.

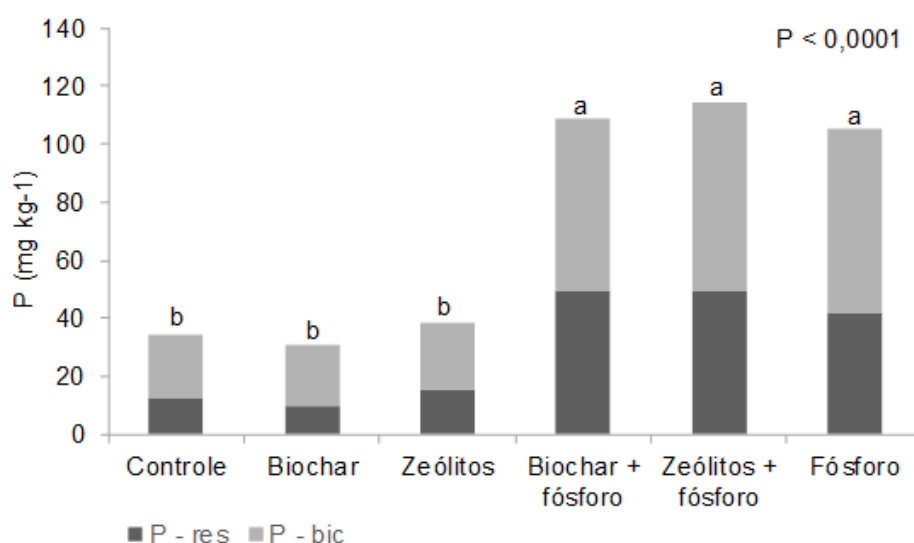


Figura 5. Fósforo disponível em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Na figura 6 constam os dados obtidos através da análise da fosfatase ácida, estes apresentam valores que apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos Fósforo (119,0 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹) para com os

tratamentos Biochar + Fósforo e os demais que não continham a aplicação de P apresentando valores entre 100,8 e 102,8 mg *p*-nitrofenol g⁻¹ solo h⁻¹.

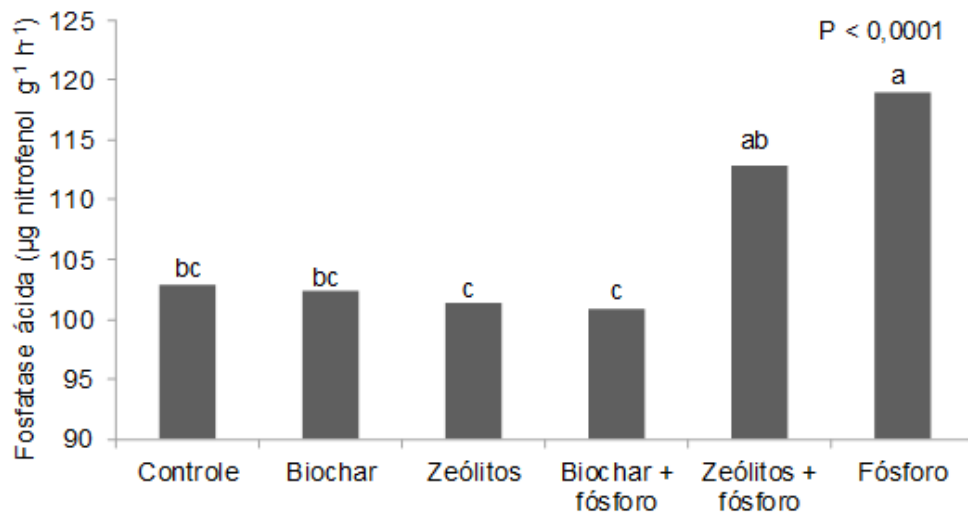


Figura 6. Análise da fosfatase ácida em função dos condicionadores do solo associados ou não a adubação fosfatada. As médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

5.2 Experimento a campo

A seguir apresentam-se os resultados encontrados nas análises realizadas com os materiais provenientes do experimento a campo, designadamente a fluorescência das clorofilas, intensidade da cor verde, biomassa e concentrações de N, P, K, Ca, Mg, B, Fe, Mn, Zn, Cu nas folhas a meio da estação de crescimento e na totalidade das plantas na data de colheita.

5.2.1 Avaliações fisiológicas e biomassa

Na tabela 10 constam os dados obtidos através das avaliações realizadas da fluorescência das clorofilas. Os valores OJIP e FV/FM e FV/F0 não registaram diferenças significativas entre tratamentos, tal como se tinha registado no experimento em vasos.

Tabela 10. Fluorescência das clorofilas em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	O	J	I	P	FV/FM	FV/F0
Condicionadores (A)						
Zeólitos	258,4 a	365,7 a	567,3 a	806,9 a	0,782 a	3,63 a
Biochar	265,8 a	326,7 a	515,4 a	766,1 a	0,771 a	3,38 a
Mineral	259,8 a	368,0 a	534,5 a	774,6 a	0,769 a	3,35 a
Doses de P (B)						
0	250,7 a	352,7 a	515,8 a	770,0 a	0,778 a	3,54 a
50	273,0 a	377,8 a	540,5 a	776,8 a	0,766 a	3,31 a
100	268,7 a	382,8 a	589,8 a	826,7 a	0,782 a	3,62 a
200	252,8 a	348,7 a	510,0 a	756,7 a	0,770 a	3,36 a
Probabilidade						
Fator A	0,8194	0,9402	0,2864	0,2941	0,2134	0,1990
Fator B	0,3391	0,1662	0,1675	0,1591	0,3271	0,3189
Interação AxB	0,9549	0,8627	0,7950	0,8383	0,3947	0,3772

Na Tabela 11 são apresentados os resultados da avaliação da intensidade da cor verde das plantas. Os valores SPAD diferiram em função dos condicionadores, mas não em função das doses de P. No conjunto, os valores médios variaram entre 57,9 e 60,5. Os valores NDVI variaram entre 0,78 e 0,80 e não diferiram entre condicionadores de solo nem entre doses de azoto. Também não se registou interação significativa entre tratamentos.

Tabela 11. Leituras de NDVI e SPAD realizadas nas plantas através dos indicadores da intensidade de cor verde, em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	SPAD	NDVI
Condicionadores (A)		
Zeólitos	60,5 a	0,79 a
Biochar	55,8 b	0,79 a
Mineral	59,1 ab	0,78 a
Doses de P (B)		
0	58,6 a	0,78 a
50	58,0 a	0,80 a
100	57,9 a	0,80 a
200	59,3 a	0,78 a
Probabilidade		
Fator A	0,0078	0,7548
Fator B	0,8128	0,4305
Interação AxB	0,7897	0,5791

Na figura 7 apresentam-se os valores da matéria seca produzida em campo. Para o fator condicionadores registou-se diferença significativa entre os tratamentos Mineral e Biochar, com valores mais elevados no primeiro. No fator doses de P surgiram também diferenças significativas, com tendência para os valores mais elevados a serem registados nas modalidades mais fertilizadas, embora diferenças significativas tenham surgido apenas para a dose P50 e não para a testemunha.

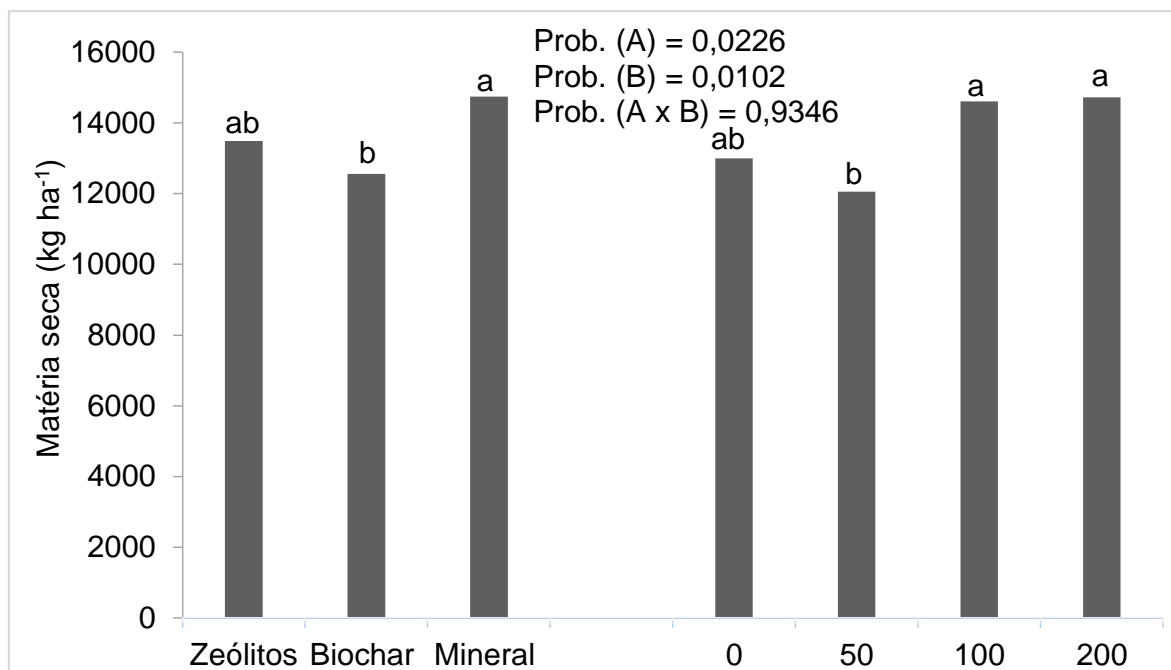


Figura 7. Produção de matéria seca em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$). A, fator condicionador; B, doses de P; e Ax B, interação.

5.2.2 Avaliações nas folhas

Na tabela 12 apresentam-se o resultado das análises dos macronutrientes das folhas colhidas a meio da estação de crescimento. Para N os valores obtidos não diferiram significativamente entre os tratamentos para ambos os fatores. Para o P não se obteve diferença significativa entre os tratamentos, tanto para o fator condicionadores como para o fator doses de P, o mesmo se observou para o K. Já para Ca, no fator condicionadores houve diferença significativa apenas entre Mineral (1,68 mg kg⁻¹) e Biochar (1,43 mg kg⁻¹), e no fator doses de P não houve diferença significativa apresentando os tratamentos valores médios entre 1,50 e 1,58 mg kg⁻¹. Para o Mg no fator condicionadores houve diferença significativa apenas entre Mineral (4,01 mg kg⁻¹) e Biochar (3,18 mg kg⁻¹) e no fator doses de P surgiu diferença significativa entre a dose de 0 kg ha⁻¹ de P (4,25 mg kg⁻¹) e as demais doses variando nestas de 3,21 a 3,45 mg kg⁻¹.

Tabela 12. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg das folhas de milho colhidas a meio da estação de crescimento em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	N	P	K	Ca	Mg
	mg kg ⁻¹				
Condicionadores (A)					
Zeólitos	27,1 a	2,77 a	16,88 a	1,52 ab	3,53 ab
Biochar	26,7 a	2,58 a	17,39 a	1,43 b	3,18 b
Mineral	28,2 a	2,70 a	15,38 a	1,68 a	4,01 a
Doses de P (B)					
0	26,8 a	2,60 a	15,65 a	1,58 a	4,25 a
50	27,7 a	2,86 a	17,47 a	1,50 a	3,39 b
100	27,5 a	2,58 a	15,79 a	1,54 a	3,45 b
200	27,5 a	2,68 a	17,28 a	1,54 a	3,21 b
Probabilidade					
Fator A	0,0765	0,2607	0,1769	0,0258	0,0091
Fator B	0,6622	0,1238	0,3293	0,8844	0,0073
Interação AxB	0,1676	0,0780	0,0857	0,4775	0,5767

Na figura 8 apresentam-se os dados obtidos do P recuperado pelas plantas, os quais tanto no fator condicionadores como nas doses de P não apresentaram diferenças significativas.

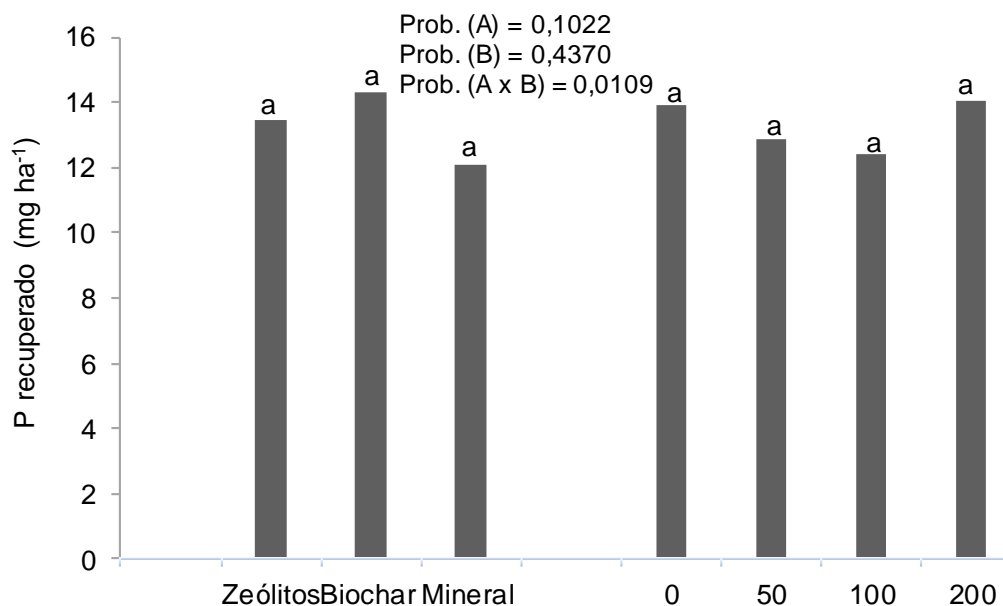


Figura 8. P recuperado (mg ha^{-1}) em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 $\text{kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$). A, fator condicionador; B, doses de P; e AxB, interação.

Na tabela 13 apresentam-se as concentrações dos micronutrientes nas folhas. Para o B não se obteve diferença significativa para ambos os fatores. Para o Fe no fator condicionadores houve diferença significativa apenas entre Mineral ($256,0 \text{ mg kg}^{-1}$) e Zeólitos ($210,4 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto no fator doses de P não houve diferença significativa. Para Mn no fator condicionadores houve diferença significativa apenas entre Mineral ($71,7 \text{ mg kg}^{-1}$) e Biochar ($53,3 \text{ mg kg}^{-1}$) e no fator doses de P não houve diferença significativa. Para Zn, no fator condicionadores houve diferença significativa apenas entre Mineral ($48,3 \text{ mg kg}^{-1}$) e Biochar ($38,8 \text{ mg kg}^{-1}$), enquanto para o fator doses de P não houve diferenças significativas. Para a concentração de Cu houve diferença significativa de Zeólitos e Mineral ($18,6$ e $18,0 \text{ mg kg}^{-1}$) para com Biochar ($15,1 \text{ mg kg}^{-1}$).

Tabela 13. Resultados da concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu das folhas de milho colhidas a meio da estação de crescimento em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg kg ⁻¹				
Condicionadores (A)					
Zeólitos	7,40 a	210,4 b	63,3 ab	41,8 ab	18,6 a
Biochar	7,53 a	227,4 ab	53,3 b	38,8 b	15,1 b
Mineral	8,57 a	256,0 a	71,7 a	48,3 a	18,0 a
Doses de P (B)					
0	7,97 a	234,8 a	62,3 a	42,8 a	16,9 a
50	8,27 a	224,8 a	61,6 a	44,8 a	17,1 a
100	7,23 a	247,5 a	62,8 a	44,8 a	18,7 a
200	7,87 a	217,8 a	67,1 a	39,3 a	16,3 a
Probabilidade					
Fator A	0,1448	0,0085	0,0021	0,0091	0,0111
Fator B	0,5231	0,2183	0,5570	0,2577	0,2582
Interação AxB	0,4336	0,6437	0,0659	0,4791	0,8165

5.2.3 Avaliações nas plantas inteiras

Na tabela 14 apresentam-se os valores da concentração dos macronutrientes nas plantas. Para o N os valores encontrados não apresentaram diferenças estatísticas para ambos os fatores. Para o P os valores obtidos no fator condicionadores Biochar (1,16 mg kg⁻¹) e Zeólitos (1,01 mg kg⁻¹) apresentaram diferenças significativas para o Mineral (0,82 mg kg⁻¹). No fator doses de P, as doses 0 (1,09 mg kg⁻¹) e 50 (1,08 mg kg⁻¹) se destacaram apresentando diferença significativa para com a dose 100 (0,86 mg kg⁻¹) e entre esta e a dose 200 (0,96 mg kg⁻¹) não ocorreram diferenças significativas. Para o K, no fator condicionadores, o Biochar (9,58 mg kg⁻¹), diferiu significativamente para com o Mineral (7,59 mg kg⁻¹). Para o fator doses de P não houve diferença significativa. Para o Ca, no fator condicionadores todos diferiram significativamente, sendo que o Mineral se sobressaiu apresentando 1,24 mg kg⁻¹, em seguida apresentou-se o Biochar com 1,05 mg kg⁻¹, seguido por Zeólitos com 0,86 mg kg⁻¹. No fator doses de P as doses 100 (1,10 mg kg⁻¹) e 200 (1,14 mg kg⁻¹) apresentaram os valores mais elevados e

diferença significativa para com as doses mais baixas. A concentração de Mg nas plantas não apresentou diferença significativa em nenhum dos fatores.

Tabela 14. Resultados da concentração de N, P, K, Ca e Mg nas plantas inteiras de milho em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	N	P	K	Ca	Mg
	mg kg ⁻¹				
Condicionadores (A)					
Zeólitos	9,30 a	1,01 a	8,40 ab	0,86 c	2,83 a
Biochar	8,80 a	1,16 a	9,58 a	1,05 b	2,59 a
Mineral	9,40 a	0,82 b	7,59 b	1,24 a	2,92 a
Doses de P (B)					
0	9,40 a	1,09 a	7,76 a	0,99 bc	2,93 a
50	9,20 a	1,08 a	8,54 a	0,96 c	2,69 a
100	9,50 a	0,86 b	8,82 a	1,10 ab	2,77 a
200	8,60 a	0,96 ab	8,98 a	1,14 a	2,73 a
Probabilidade					
Fator A	0,4381	0,0004	0,0295	0,0001	0,1198
Fator B	0,4123	0,0238	0,4547	0,0023	0,5927
Interação AxB	0,3246	0,0024	0,4611	0,0098	0,1088

Na tabela 15 apresentam-se as concentrações médias dos micronutrientes nas plantas inteiras. Para o B, no fator condicionadores, o Biochar (8,78 mg kg⁻¹) diferiu significativamente para Zeólitos (7,09 mg kg⁻¹) e mineral (7,34 mg kg⁻¹), já para o fator doses de P não houve diferenças significativas. Para o Fe no fator condicionadores o Biochar (108,3 mg kg⁻¹) diferiu significativamente de Zeólitos e Mineral que apresentaram 78,0 e 45,6 mg kg⁻¹, respectivamente. Para o fator doses de P não houve diferenças significativas. Para Mn, no fator condicionadores Mineral (36,0 mg kg⁻¹) diferiu significativamente de Zeólitos (28,5 mg kg⁻¹) e Biochar (30,0 mg kg⁻¹) e no fator doses de P a dose 200 diferiu significativamente da dose 0 com valores de 35,1 e 28,5 mg kg⁻¹, respectivamente. Para a concentração de Zn no fator condicionadores Biochar (25,2 mg kg⁻¹) diferiu significativamente de Zeólitos (21,8 mg kg⁻¹) e Mineral (22,4 mg kg⁻¹), enquanto para o fator doses de P não houve diferenças significativas. Para a concentração de Cu nos tecidos, no

fator condicionadores Mineral (7,12 mg kg⁻¹) diferiu significativamente dos demais, seguido por Biochar (6,23 mg kg⁻¹) que também diferiu significativamente de Zeólitos (4,45 mg kg⁻¹). No fator doses de P não houve diferenças significativas.

Tabela 15. Resultados da concentração de B, Fe, Mn, Zn e Cu nas plantas inteiras de milho em função do condicionador de solo (Zeólitos, Biochar, Mineral) e da dose de P (0, 50, 100, 200 kg P₂O₅ ha⁻¹). Para cada fator, médias seguidas da mesma letra não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ($\alpha = 0,05$).

Fatores	B	Fe	Mn	Zn	Cu
	mg kg ⁻¹				
Condicionadores (A)					
Zeólitos	7,09 b	78,0 b	28,5 b	21,8 b	4,45 c
Biochar	8,78 a	108,3 a	30,0 b	25,2 a	6,23 b
Mineral	7,34 b	85,6 b	36,0 a	22,4 b	7,12 a
Doses de P (B)					
0	7,51 a	95,3 a	28,5 b	23,1 a	6,08 a
50	7,54 a	82,8 a	31,0 ab	24,0 a	5,90 a
100	7,21 a	88,2 a	31,5 ab	22,0 a	5,95 a
200	8,69 a	96,3 a	35,1 a	23,4 a	5,80 a
Probabilidade					
Fator A	0,0078	0,0078	0,0007	0,0064	<0,0001
Fator B	0,1041	0,1041	0,0314	0,3979	0,7596
Interação AxB	0,0019	0,0019	0,0020	0,0202	0,2746

6. Discussão

As determinações fisiológicas se demonstraram pouco sensíveis aos tratamentos quer no experimento em vasos quer no experimento a campo. Hurtado et. al. (2008) usaram um clorofilômetro para determinar a intensidade da cor verde e as determinações realizadas foram sensíveis, porém servindo mais especificamente como indicadores para a adubação nitrogenada. Povh et. al. (2008) em estudo realizado em cereais relataram uma situação similar à encontrada nesse experimento, tendo concluído que o NDVI apresenta pouco potencial para avaliar o estado nutricional da cultura do milho. Prado (2008) concluiu que o uso deste índice é mais adequado para quantificação de N uma vez que a aplicação de P não interferiu nas leituras. Contudo, a aplicação de P influenciou os valores de N na leitura SPAD.

A produção nos vasos e no campo respondeu à adubação fosfatada. Resultado similar foi relatado por Veloso et al. (2012), que concluíram que o milho responde bem à adubação fosfatada independentemente da fonte de P utilizada. As doses de P que maximizaram a produtividade foram equivalentes às encontradas neste trabalho, situando-se entre 100 e 200 Kg ha⁻¹. Coelho (2006) relatou também resultados equivalentes justificando que pelo fato do aproveitamento pela cultura do P as doses recomendadas são normalmente altas.

A concentração de P nos tecidos nos vasos foi mais elevada no tratamento Zeólitos + fósforo que nos tratamentos Controle e Biochar + fósforo. No experimento a campo a concentração de P nas folhas não variou de forma significativa entre tratamentos. Para o P nas plantas os valores obtidos no fator condicionadores foram significativamente mais elevados nos Biochar e Zeólitos em comparação com o Mineral. No fator doses de P, as aplicações de 0 e 50 kg P₂O₅ ha⁻¹ originaram teores de P nos tecidos mais baixas que as demais. Ou seja, os condicionadores Biochar e Zeólitos, quando analisado o teor de P nas plantas de milho apresentaram valores mais elevados tanto no experimento em vasos como também a campo. Estudos realizados por Oliveira (2012) e Silva (2019) mostraram também que o Biochar quando aplicado ao solo tende a aumentar os teores de P foliar tal como constatado neste experimento. Bernardi et al. (2008) também constatou o aumento nos teores

foliares de P quando se forneceu o condicionador Zeolito. Já em relação ao fator doses de P do experimento em campo Harger et al. (2007) relatou em experimento realizado em vasos que os teores de P foliar tendem a aumentar conforme o acréscimo das doses de P, o que corrobora com o resultado que foi encontrado nesse experimento. O maior efeito do P no experimento em vasos pode dever-se à menor área de expansão radicular estando as plantas mais dependentes do P aplicado.

Quanto aos macros e micronutrientes avaliados nas plantas inteiras de ambos os experimentos e nas folhas das plantas do experimento em campo, os resultados obtidos mostram no experimento em vasos não ocorreram diferenças significativas exceto para o Mn. No campo para as análises realizadas em plantas e em folhas no geral os resultados mostram uma diferença significativa no fator condicionadores mostrando que o Biochar e os Zeólitos em sua maioria apresentaram respostas positivas para com o Mineral destacando os metais pesados. No fator doses de P, as mesmas em sua maioria não originaram diferenças significativas nos resultados. Quanto aos metais pesados (Mn, Cu, Zn e Fe), Sousa (2015) em estudo realizado com Biochar relatou que os teores de Mn foram mais altos quando aplicado o biochar do que quando não aplicado, porém continuaram dentro do adequado para a cultura que, de acordo com Cantarella et al. (1997), é de 20 a 200 mg kg⁻¹. Também nestes experimentos os resultados se mantiveram dentro daquele intervalo. Santos (2009) também relatou que o Biochar reduziu a disponibilidade de metais pesados no solo. Martins (2003) em estudo realizado com aplicação de lodo de esgoto na cultura do milho constatou que as concentrações de Fe e Mn diminuíram com a aplicação do lodo de esgoto e que o Cu não foi influenciado pelo mesmo. Núñez (2015) em estudo realizado com Zeólitos mesclados com rocha fosfórica concluiu que os teores de nutrientes do tecido vegetal tiveram aumento significativo.

Para os valores de P extraível, P lábil, P exportado e atividade da fosfatase ácida, os resultados mostraram o que de fato era esperado. Os tratamentos com aplicação de P apresentaram valores mais elevados, independentemente da associação ou não com os condicionadores do solo. A somatória do P resina e do P bicarbonato foi igual ao valor do P lábil no solo. Estes diferiram significativamente apenas quando houve a adição de P, sendo

que entre os tratamentos com P associados ou não aos condicionadores não houve diferenças. Torqueti (2015) em estudo realizado com zeólitos associados ou não a uma fonte de fosfato relatou que na ausência dos zeólitos o fosfato se otimizou como fonte de fósforo. Já Santos (2015), realizou um estudo com o uso do Biochar e fertilizante fosfatado, e concluiu com este que a associação do biochar com o fertilizante fosfatado não interferiu na eficiência do P pela cultura do milho, uma vez que este foi cultivado em solo argiloso o qual apresenta elevada capacidade de fixação de P. Também Silva (2016) e Sousa (2015) constataram que o uso do biochar promoveu alterações nas propriedades químicas do solo, destacando o aumento nos teores de P no solo. Em relação ao P desassociado dos condicionadores, Herrera (2014) relatou que a aplicação de P teve relevância uma vez que aumentou os teores de Pi tanto da fração lábil como também da fração não lábil. Quando se trata da fosfatase ácida, relata-se a importância desta avaliação uma vez que quantifica mais precisamente o P biodisponível no solo. Mioranza (2016) relatou que esta é mais influenciada pelo pH e pelo uso do solo do que pela aplicação do biochar. Já Ferreira (2018) concluiu que a atividade da enzima é reflexo da disponibilidade de Pi no solo uma vez que a atividade se reduz com o aumento do Pi. Quando aumenta o teor de matéria orgânica também aumenta a atividade da enzima.

De maneira geral a avaliação das propriedades no solo no experimento em vasos mostra que a aplicação dos condicionadores e do fósforo não apresentou diferenças expressivas. A própria matéria orgânica não apresentou diferenças. Bruun (2012) relatou que não há evidência de aumento na degradação da matéria orgânica do solo decorrente da adição do Biochar, concluindo que não há redução da estabilidade da matéria orgânica do solo pela adição do condicionador. Em relação a CTCe e ao K os tratamentos não apresentaram diferenças a não ser o Controle que apresentou valores mais baixos. Silva (2018) em estudo realizado com biochar e zeólitos relatou que a estrutura dos mesmos contribuiu para um aumento da capacidade de troca catiônica do solo, porém apenas quando aplicados em conjunto. Para o Zn, um micronutriente de grande importância para a cultura do milho, os tratamentos que receberam P mostraram resultados tendencialmente superiores aos tratamentos que não receberam P. Porém Lopez (1974) verificou em seus

estudos que a adubação fosfatada não influenciou na disponibilidade de Zn no solo, apenas diminuiu sua concentração na planta. O pH apresentou valores médios maiores quando foram aplicados de Zeólitos e Biochar de modo geral.

Covalski (2018) apontou que os zeólitos apresentam uma maior tendência de controlar os nutrientes no solo, o que pode estar associado a natureza do íon, e destacou que a resposta das culturas a adição dos condicionadores no solo tendencialmente dependem da espécie a ser cultivada e do tempo que estes permanecem no solo.

7. Conclusão

Este estudo mostrou a elevada importância da aplicação do P para a cultura do milho, uma vez que os indicadores de estado nutricional e a produção aumentaram sempre que o nutriente se encontrava em condições limitantes no meio, como ocorreu no experimento em vasos.

Quanto aos condicionadores, estes revelaram um conjunto de interações diversas na disponibilidade dos nutrientes no solo, mas não foi clara a sua relação com a produtividade.

8. Referencias

ALEF, K.; NANNIPIERI, P.; TRAZER-CEPEDA, C. Phosphatase activity. In: Alef, K & Nannipieri, P (Eds). *Methods in applied soil microbiology and biochemistry*. **Academic Press**, Inc. San Diego, USA. 1995

ALMEIDA, B. M. Déficit e excesso hídrico na cultura do milho (*Zea mays L.*) em ambiente protegido. 124f. **Tese (Doutorado em Ciências.)** – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba. 2016.

ALMEIDA, B. M. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. 104f. **Tese (Doutorado em Agronomia.)** – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba. 2008.

ALMEIDA, L. A. V., BALBINO, L. R. Determinação do fósforo e potássio assimiláveis em alguns solos do país. **Anais do Instituto Superior de Agronomia**. Lisboa, 1960.

ARRUDA, J. A.; AZEVEDO, T. A. O.; FREIRE, J. L. O.; BANDEIRA, L. B.; ESTRELA, J. W. M.; SANTOS, S. J. A. (2016) Uso da cinza de biomassa na agricultura: efeitos sobre atributos do solo e resposta das culturas. **Revista Principia Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, nº 30. João Pessoa, Setembro 2016.

BARBOZA, R. Produtividade de culturas de grãos obtida pela aplicação isolada e combinada de condicionadores de solo. 72f. **Dissertação (Mestrado em Agricultura de precisão.)** – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2015.

BARROS, J. F. C.; CALADO, J. G. (2014) A Cultura do Milho. Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Évora, Departamento de Fitotecnia. Évora 2014.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; BERGONCI, J. I.; BIANCHI, C. A. M.; MÜLLER, A. G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. (2004) Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.9, p.831-839, Setembro 2004.

BERNARDI, A. C. C.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; POLIDORO, J. C. Potencial de uso de zeólitas na agropecuária. **Embrapa Pecuária Sudeste**, São Carlos-SP Dezembro, 2008.

BERNARDI, A. C. C.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; POLIDORO, J. C. Potencial de uso de zeólitas na agropecuária, **Embrapa Pecuária Sudeste** nº 85. Dezembro, São Carlos, SP 2008.

BERNARDI, A. C. C.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; REZENDE, N. G. A. M.; PAIVA, P. R. P.; MONTE, M. B. M. 2008. Crescimento e nutrição mineral do porta-enxerto limoeiro 'cravo' cultivado em substrato com zeólita enriquecida com NPK. **Rev. Bras. Frutic., Jaboticabal** - SP, v. 30, n. 3, p. 794-800, Setembro 2008.

BERNARDI, A. C.C.; BERNARDI, M. R. V.; WERNECK, C. G.; HAIM, P. G.; MONTE, M. B. M. (2005) Produção, aparência e teores de nitrogênio, fósforo e potássio em alface cultivada em substrato com zeólita. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.23, n.4, p.920-924, out-dez 2005.

BRAGA, A. A. C.; MORGON, N. H. (2007) Descrições estruturais cristalinas de zeolitos. **Revista Química Nova**, v.30, nº1, 178-188. 2007.

BREMNER, J. M. **Nitrogen-Total. In Methods of soil analysis.** Part 3. Chemical Methods- SSSA. Book series nº 5.

BRUUN, S. AND EL-ZEHERY, TAREK. 2012. Efeito do "biochar" na mineralização da matéria orgânica do solo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.47, n.5, p.665-671, maio 2012.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van & CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C., eds. Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, **Instituto Agrônomo de Campinas/Fundação IAC**, 1997. p.45-71.

CASALI, C.A. **Sistemas de culturas sob diferentes manejos por longa duração alteram as formas de fósforo do solo?** 2012. 149 f. Tese (Doutorado), Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

COELHO, A. M. 2006. Nutrição e Adubação do Milho. **Embrapa Circular Técnica 78**. Sete Lagoas, MG Dezembro, 2006.

COELHO, A. M. Nutrição e Adubação do Milho. **Embrapa**, Circular Técnica 78. Sete Lagoas, Minas Gerais, Dezembro, 2006.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - CQFSRS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre, SBCS - Núcleo Regional Sul/UFRGS, 2004. 400p.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. Série histórica das safras. Disponível em: <<https://www.Conab.gov.br/info-agro/safras/serie-historica-das-safras>>. Acesso em: 21 nov. 2018a.

CONTINI, E.; MOTA, M. M.; MARRA, R.; BORGHI, E.; MIRANDA, R. A.; SILVA, A. F.; SILVA, D. D.; MACHADO, J. R. A.; COTA, L. V.; COSTA, R. V.; MENDES, S. M. (2019)

Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos. **Embrapa**, Série Desafios do Agronegócio Brasileiro, Fevereiro 2019.

COVALSKI, C. A. 2018. Influência da aplicação de Biochar e Zeólitos na dinâmica do azoto no sistema solo-planta. 83f. **Dissertação (Mestre em**

Tecnologia Ambiental). Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança, 2018.

CRUZ, J. C.; FILHO, I. A. P.; ALVARENGA, R. C.; NETO, M. M. G.; VIANA, J. H. M.; OLIVEIRA, M. F.; MATRANGOLO, W. J. R.; FILHO, M. R. A. (2010) Cultivo do Milho. **Embrapa Milho e Sorgo Sistemas de Produção**, 2 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 6^a edição Setembro 2010.

FAO, 2017. **FAOSTAT**. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Acesso Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: Julho 2019.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas** -- Lavras: UFLA / FAEPE, 2005. p.: il. - Curso de Pós-Graduação "Lato Sensu" (Especialização) a Distância: Solos e Meio Ambiente.

FARIAS, W. M. Biochar de lodo de esgoto como condicionador do solo: efeitos nas propriedades agronômicas, fertilidade do solo e qualidade da matéria orgânica. 121f. **Tese (Doutorado em Agronomia.)** – Universidade de Brasília. Brasília. 2018.

FERREIRA, I. A. Q. M. 2018. Estudos de fertilização de azoto, fósforo, potássio e boro em oliveira. 235f. Tese (Doutorado em Biociencias). **ESCUELA SUPERIOR Y TÉCNICA DE INGENIERÍA AGRARIA INGENIERÍA DE BIOSISTEMAS**, León, 2018.

FERREIRA, M. M. M. (2012) Sintomas de deficiência de macro e micronutrientes de plantas de milho híbrido BRS 1010. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 6, n. 1, p. 74-83, janeiro-abril, Boa Vista, RR 2012.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo às plantas. Dissertação** (Doutorado em Agronomia) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L.C. et. al. **Tópicos em Ciência do Solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa- MG, v.8, p. 141-187, 2013.

Gomes. S. B. V.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M. (2007) Produtividade e composição mineral de plantas de milho em solo adubado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.11, n.5, p.459–465, Campina Grande 2007.

GRANT, C.A.; FLATEN, D.N.; TOMASIEWICZ, D.J.; SHEPPARD, S.C. (2001) A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. POTAFOS - **Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato**. Informações Agrônomicas Nº 95 – Setembro, 2001

HAVLIN, J. L.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D. Soil Fertility and Fertilizers. Pág. 187-188.

HARGER, N.; BRITO, O. R.; RALISCH, R.; ORTIZ, F. R.; WATANABE, T. S. 2007. Avaliação de fontes e doses de fósforo no crescimento inicial do milho. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 39-44, jan./mar. 2007.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B. & CHAUHAN, B.S. 1982. Changes in organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Sci. Soc. Am.J.**, 46:970-976.

HERRERA, W. F. B. 2014. Disponibilidade de fosforo no solo e eficiência agrônômica de fontes fosfatadas solúvel e complexada com substâncias húmicas. 95f. **Dissertação (Mestrado em Ciências.)**. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2014.

HURTADO, S. M. C.; ALBERTO SILVA, C.; RESENDE, A. V.; CORAZZA, E. J.; SHIRATSUCHI, L. S.; HIGASHIKAWA, F. S. 2010. Sensibilidade do clorofilômetro para diagnóstico nutricional de nitrogênio no milho. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 688-697, maio/jun., 2010.

Instituto Nacional de Estatística. Estatísticas Agrícolas 2018; Lisboa, Portugal, Julho 2019.

KEREN, R. 1996. **Boron.** In **Methods of soil analysis. Part 3.** Chemical Methods- SSSA. Book series nº 5.

KLEIN, C.; AGNE, S.A.A. Fósforo: de nutriente à poluente!. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 8, p.1713-1721, 2013.

LOPEZ G., O. E. and MALAVOLTA, E.. **Estudos sobre as relações entre zinco e fósforo na nutrição da planta.** *An. Esc. Super. Agric. Luiz de Queiroz* [online]. 1974, vol.31, pp.467-483. ISSN 0071-1276. <http://dx.doi.org/10.1590/S0071-12761974000100037>.

MARTINS, A. L. C.; BATAGLIA, O. C.; CAMARGO, O. A.; CANTARELLA, & H. 2003. Produção de grãos e absorção de Cu, Fe, Mn E Zn pelo milho em solo adubado com lodo de esgoto, com e sem calcário. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:563-574, 2003.

MIORANZA, M. 2016. Efeito da aplicação do biocarvão nos atributos microbiológicos do solo, cultivado com teca, no bioma Amazônia. 70f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia).** Universidade Federal de Mato Grosso, Sinop, 2016.

MOREIRA, R. O. Morfologia, massa seca e teores de nutrientes em milho de pipoca e em girassol sob doses de composto orgânico com zeólita. 77f. **Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical.)** – Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá. 2018.

NETO, J. F. B.; TERRA, T. F.; WIETHÖLTER, P.; BISPO, N. B.; SERENO, M. J. C. M. (2008) Origem e evolução de plantas cultivadas: Milho, uma cultura sob domínio humano. 1ª edição, Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2008. 909 p: il.

NETO, J. F. B.; TERRA, T. F.; WIETHÖLTER, P.; BISPO, N. B.; SERENO, M. J. C. M. (2008) Origem e evolução de plantas cultivadas: Milho, uma cultura sob domínio humano. 1ª edição, Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**, 2008. 909 p: il.

NÓBREGA, I. P. C. Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: - Sequestro de carbono no solo. 46f. **Tese (Mestrado em Engenharia do Ambiente)** – Instituto Superior de Agronomia. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2011.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. (2015) Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use - a critical review. **Brasileira de Ciência do Solo**, 39:321-344, 2015.

NÚÑEZ, M. S.; NÚÑEZ, J. E. V. 2015. Influencia de zeolita y roca fosfórica sobre el desarrollo de los cultivos de sorgo y papa. **Ciência Agropecuária no**. 23:60-74. 2015.

OLIVEIRA, D. M. Biocarvão de bambu e fontes de fosforo afetando a disponibilidade de P e o crescimento de feijão caupi e milho em latossolo amarelo distrófico da Amazônia. 30f. **Dissertação (Mestrado em Ciências grárias.)** – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA. Manaus, Amazonas. Julho, 2012.

PAIVA, M. R. F. C.; SILVA, G. F.; OLIVEIRA, F. H. T.; PEREIRA, R. G.; QUEIROGA, F. M. (2012) Doses de nitrogênio e fósforo recomendadas para produção econômica de milho-verde na Chapada do Apodi – RN. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 25, n. 4, p. 1-10, out-dez. 2012.

PETTER, F. A.; LIMA, L. B.; MORALES, M. M.; JÚNIOR, B. H. M.; MORAIS, L. A. (2016) Biocarvão no solo: aspectos agronômicos e ambientais. **Embrapa Florestas**, Colombo, PR, 2016.

POVH, F. P.; MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; MOLIN, R.; SALVI, J. V. 2008. Comportamento do NDVI obtido por sensor ótico ativo em cereais. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.43, n.8, p.1075-1083, ago. 2008.

PRADO, R. M.; VALE, D. W. 2008. Nitrogênio, fosforo e potássio na leitura SPAD em porta-enxerto de limoeiro cravo. **Pesquisa Agropecuária Tropical** v. 38, n. 4, p. 227-232, out./dez. 2008.

RESENDE, A.V. Agricultura e Qualidade da Água: Contaminação de Água por Nitrato. **Embrapa – Documentos** 57, 28 p, 2002.

RESENDE, N. G. A. M.; MONTE, M. B. M.; PAIVA, P. R. P. Rochas & minerais industriais usos e especificações: **Zeolitas Naturais**. 2a Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

SANTOS, A. O. Características agronômicas e degradação de grãos e da planta de milho em diferentes épocas de semeadura e de maturidade. 62f. **Dissertação (Programa de Pós Graduação em Agronomia)** – Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2012.

SANTOS, N. M. 2009. Ácidos húmicos e carvão vegetal ativado na redução da disponibilidade de metais pesados em solo contaminado. 58f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)**. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2009.

SANTOS, S. R. 2015. Biocarvão associado a fertilizante e sua influência no aproveitamento de fósforo pela planta. 38f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia)**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

SERRANO, J.; PEÇA, J.; SILVA, J. M.; SHAHIDIAN, S. (2014) Aplicação de fertilizantes: tecnologia, eficiência energética e ambiente. **Revista de Ciências Agrárias**, 2014, 37(3): 270-279.

SILVA, D. L. 2018. EFEITO DA APLICAÇÃO DE CONDICIONADORES DO SOLO NA BIODISPONIBILIDADE DE METAIS PESADOS. 93f. **Dissertação (Mestre em Tecnologia Ambiental)**. Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança, 2018.

SILVA, R.; RODRIGUES, L.; SILVA, M.; SILVA, B.; MARTINS, M. Biochar e mucuna incrementam o crescimento e nutrição de mamoeiro, bem como a fertilidade do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 49, p. e55210, 10 jul. 2019.

SILVA, W M. 2016. Aplicação do biochar de resíduos de café em neossolo regolítico : efeitos nas características químicas e biológicas e na produção de milho e feijão. 57 f. **Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Produção Agrícola)** - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, 2016.

SOUSA, A. A. T. C. Biochar de lodo de esgoto: efeitos no solo e na planta no cultivo de rabanete. 63f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia.)** – Universidade de Brasília Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Brasília. 2015.

TIECHER, T. **Dinâmica do fósforo em solo muito argiloso sob diferentes preparos de solo e culturas de inverno**. 2011. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Curso de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2011.

TORQUETI, S. T. S. 2015. Efeito de zeólita e fontes alternativas de potássio e fósforo no cultivo de girassol ornamental (*Helianthus annuus* L.) 65f. **Dissertação (Mestrado em Agronomia.)**. Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

USDA. United States Department of Agriculture. Foreign agricultural service: custom query. Disponível em:

<<https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/advQuery>>. Acesso em: 30 ago. 2018d.

VAN REEUWIJK. Procedures for soil analysis. Sixth edition. ISRIC. **FAO**. 2002. Veloso, C. A. C.; Franzini, V. I.; Baizi e Silva, A. R.; Resende Silva, A. Resposta do Milho à Adubação Fosfatada em um Latossolo Amarelo do Estado do Pará. **Embrapa Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 83**. Embrapa Amazônia Oriental Belém, PA 2012.

VILELA, F. J. Desenvolvimento de um Condicionador de Solos com valor agregado a partir da biomassa de *Magonia pubescens*. 105f. **Tese (Doutorado em Química.)** – Universidade de Brasília. Brasília. 2017.

WALINGA, I., VAN VARK, W., HOUBA, V.J.G., van der Lee, J.J. 1989. **Soil and Plant analysis. Part 7 Plant analysis procedures**. Department of Soil Science and Plant Nutrition. Landbouwniversiteit Wageningen.

WALINGA, I.; VAN VARK, W.; HOUBA, V. J. G; VAN DER LEE, J. J; Soil and Planta analysis. Part 7 Planta analysis. **Department of soil science and plant nutrition**. 1989.

WANG, H.; STUDER, A. J.; ZHAO, Q.; MEELEY, R.; DOEBLEY, J. F. (2015) Evidence That the Origin of Naked Kernels During Maize Domestication Was Caused by a Single Amino Acid Substitution in *tga1*. **Genetics**, Vol. 200, 965–974 July 2015.

WRB - World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015. International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO, Rome. 2015.

ZOPOLLATO, M. Produtividade, composição morfológica e valor nutritivo de cultivares de milho (*Zea Mays L.*) para produção de silagem sob os efeitos da maturidade. 229f. **Tese (Doutorado em Agronomia)** – Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Piracicaba. 2007.