



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA AGROALIMENTAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM HORTICULTURA TROPICAL

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO MILHO VERDE COM FERRO E ZINCO

POMBAL – PB
2019

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO MILHO VERDE COM FERRO E ZINCO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Horticultura Tropical da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito na obtenção do título de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha

O48b Oliveira, Flavio Sarmiento de.
Biofortificação agrônômica do milho verde com ferro e zinco / Flavio Sarmiento de Oliveira. – Pombal, 2020.
49 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar, 2019.

“Orientação: Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha”.
Referências.

1. *Zea mays* L. 2. Alimentos biofortificados. 3. Enriquecimento do solo. 4. Segurança nutricional. 5. Micronutrientes. I. Rocha, Josinaldo Lopes Araujo. II. Título.

CDU 633.15(043)

FLAVIO SARMENTO DE OLIVEIRA

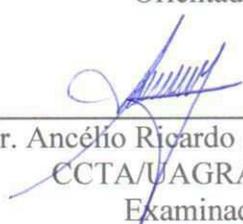
**BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO MILHO VERDE COM
FERRO E ZINCO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Horticultura Tropical da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito na obtenção do título de mestre.

Aprovada em: 15 de maio de 2019



Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha
CCTA/UAGRA/UFCG
Orientador



Prof. Dr. Ancélio Ricardo de Oliveira Gondim
CCTA/UAGRA/UFCG
Examinador

Prof. Dr. Francisco Hevilásio Freire Pereira
CCTA/UAGRA/UFCG
Examinador

*Ao meu grande amor, minha noiva
Brenda Barbosa da Silva.*

DEDICO!

AGRADECIMENTOS

A DEUS, sobretudo, pelo presente da vida, pela força e sabedoria necessária durante a jornada acadêmica;

Ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), através do Programa de Pós-Graduação em Horticultura Tropical (PPGHT), pela oportunidade de realização do curso de Mestrado;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo;

Ao professor e orientador Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha, pela paciência, orientação, ensinamentos e pelo exemplo de profissionalismo, ética e dedicação ao ensino e pesquisa de qualidade;

Aos professores do PPGHT/UFCG pelos conhecimentos construídos ao longo do curso;

Ao Centro de Ciências Agrárias (CCA), da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), na pessoa do Prof. Dr. Adailson Pereira de Souza, pela concessão de uso das instalações do Laboratório de Solos e Nutrição de Plantas para a realização de análises químicas da pesquisa;

A secretaria do PPGHT, na pessoa de Rose Carla;

Aos membros da banca de avaliação, pela disponibilidade, colaboração e sugestões para melhoria do trabalho;

Aos meus pais, Francisco João de Oliveira e Maria Euza Sarmiento de Oliveira,

A minha noiva, Brenda Barbosa da Silva, pelo imenso amor, incentivo, carinho e cumplicidade em cada etapa da vida;

Ao meu irmão Fernando Sarmiento de Oliveira;

Ao meu amigo Francisco de Assis de Freitas, pela ajuda na condução da pesquisa;

Aos meus colegas da turma de Mestrado, pelos momentos felizes de convivência durante o curso;

Por fim, reitero minha gratidão a todos, que muito embora não tenham seus nomes acima citados por lapso pontual de memória, não obstante contribuíram de forma direta e/ou indireta para a realização deste trabalho.

MEU MUITO OBRIGADO!

OLIVEIRA, Flavio Sarmiento. **Biofortificação agronômica do milho verde com ferro e zinco**. 2019. 49p. Dissertação (Mestrado em Horticultura Tropical) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB¹.

RESUMO

A fome oculta é um grave problema de segurança nutricional no mundo, estimando-se que, aproximadamente, cinco bilhões de pessoas possuam deficiência de Fe e cerca de 1,5 bilhão de Zn. Entre muitas alternativas para mitigar os efeitos da deficiência de micronutrientes na alimentação, destaca-se a biofortificação de alimentos, através das práticas de enriquecimento do solo com maiores teores nutricionais. Grãos verdes de milho (*Zea mays* L.) se destacam como fonte de alimento em regiões mais pobres, contudo, apresenta baixa concentração de Fe e Zn, o que não contribui para minimizar o quadro de deficiência em humanos. O objetivo do trabalho foi incrementar, por meio da biofortificação agronômica, os teores de Fe e Zn no grão de milho verde a partir do manejo da fertilidade do solo. Foram conduzidos dois experimentos paralelos sob condições irrigadas de campo, em Luvisolo Crômico do município de Vieirópolis – PB, entre março e junho de 2018. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições, em cada experimento. No Experimento I, estudou-se a aplicação de cinco doses de adubação com o micronutriente Fe e no Experimento II, a aplicação de cinco doses de Zn, sendo aplicados totalmente via adubação de fundação do solo, tendo ambos os Experimentos desenvolvidos nas seguintes doses: 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 kg ha⁻¹. Foram avaliados os teores e acúmulos foliares e nos grãos quanto aos nutrientes Fe e Zn, além das características de fitomassa fresca e seca nos componentes da planta. Também foram quantificados os teores de Fe e Zn no solo ao final dos experimentos. As doses de Fe influenciaram na fitomassa fresca e seca de sabugo e grãos, bem como nos teores e acúmulos na folha, grãos e teores no solo. Não houve efeito significativo das doses de Zn no solo sob as características de fitomassa seca e fresca dos componentes da planta. As diferentes doses de Zn afetaram o teor e acúmulo deste nas folhas e o teor no solo. Para o presente trabalho, a biofortificação agronômica do milho verde com o ferro, nas doses estudadas, se mostrou ineficiente em aumentar o teor deste nutriente nos grãos de milho verde. A biofortificação agronômica do milho verde com zinco, em doses até 10 kg ha⁻¹, não apresentou resposta significativa no incremento dos teores deste micronutriente nos grãos. Para ambos os micronutrientes, a prática apresentou efeito significativo positivo sobre o teor e acúmulo de ferro e zinco nas folhas de milho verde, híbrido AG 1051, com melhor desempenho observado em função da maior dose empregada.

Palavras-chave: Micronutrientes. *Zea mays* L. Alimentos biofortificados. Segurança nutricional. Enriquecimento do solo.

¹ Orientador: Prof. Dr. Josinaldo Lopes Araujo Rocha.

OLIVEIRA, Flavio Sarmiento. **Agronomic Biofortification of Green Corn with Iron and Zinc**. 2019. 49p. Dissertation (Master Degree in Tropical Horticulture) - Federal University of Campina Grande, Pombal – PB.

ABSTRACT

Hidden hunger is a serious nutritional security problem in the world, with an estimated five billion people with Fe deficiency and about 1.5 billion Zn. Among many alternatives to mitigate the effects of micronutrient deficiency on food, the biofortification of food is highlighted through the soil enrichment practices with higher nutritional contents. Green maize grains (*Zea mays* L.) stand out as a source of food in poorer regions, however, shows low concentration of Fe and Zn, which does not contribute to minimize the picture of disability in humans. The objective of the study was to increase, by means of agronomic biofortification, the contents of Fe and Zn in the grain of green corn from the management of soil fertility. Two parallel experiments were conducted under irrigated field conditions, in Luvisolo chromic of the city of Vieirópolis – PB, between March and June 2018. The experimental design was that of casualized blocks, with five treatments and four repetitions, in each experiment. In Experiment I, we studied the application of five doses of fertilizer with the Fe micronutrient and Experiment II, the application of five doses of Zn, being applied entirely via the soil foundation fertilization, having both Experiments developed in the following doses: 0; 2.5; 5.0; 7.5 e 10.0 kg ha⁻¹. The foliar and grain contents and accumulations were evaluated for the Fe and Zn nutrients, in addition to the characteristics of fresh and dry phyto mass in the plant components. The levels of Fe and Zn in soil were also quantified at the end of the experiments. Fe doses influenced the fresh and dry phytomic matter of the clouds and grains, as well as the contents and accumulations in the leaf, grains and soil contents. There was no significant effect of the doses of Zn on the soil under the dry and fresh phyto-mass characteristics of plant components. The different doses of Zn affected the content and accumulation of this in the leaves and the content in the soil. For the present study, the agronomic biofortification of green corn with iron, in the doses studied, proved inefficient in increasing the content of this nutrient in the grains of green corn. The agronomic biofortification of green corn with zinc, in doses up to 10 kg ha⁻¹, did not present a significant response in the increase of the levels of this micronutrient in the grains. For both micronutrients, the practice had a significant positive effect on the content and accumulation of iron and zinc in the leaves of green corn, hybrid AG 1051, with a better performance observed as a function of the highest dose employed.

Keywords: Micronutrients. *Zea mays* L. Biofortified foods. Nutritional security. Soil enrichment.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 –	Valores de temperatura mínima (tMin) e temperatura máxima (tMax) registrados no período de condução dos experimentos. Pombal – PB, 2019.....	19
Figura 2 –	Valores de umidade relativa mínima (URMin) e máxima (URMax) do ar e dados de evapotranspiração máxima (ETo) registrados no período de condução dos experimentos. Pombal – PB, 2019.....	20
Figura 3 –	Desenho esquemático da parcela experimental utilizada nos experimentos. Pombal – PB, 2019.....	21
Figura 4 –	Fitomassa fresca de sabugo de milho verde em respostas às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	25
Figura 5 –	Fitomassa seca de grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	26
Figura 6 –	Fitomassa seca de sabugo de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	27
Figura 7 –	Fitomassa seca de espiga de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	28
Figura 8 –	Fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	28
Figura 9 –	Participação percentual (%) do ‘caule’, ‘folha’, ‘palha’, ‘grão’ e ‘sabugo’ na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	29
Figura 10 –	Proporção de fitomassa seca de sabugo (%) na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	30
Figura 11 –	Teor de ferro na folha de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	31
Figura 12 –	Acúmulo de ferro na folha de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	32
Figura 13 –	Teor de ferro no grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	33
Figura 14 –	Acúmulo de ferro no grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	34
Figura 15 –	Teor de ferro no solo da área de cultivo de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas. Pombal – PB, 2019.....	34
Figura 16 –	Participação percentual de caule, folha, palha, grão e sabugo na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	37
Figura 17 –	Teor de zinco na folha de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	39
Figura 18 –	Acúmulo de zinco na folha de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	39
Figura 19 –	Teor de zinco no solo em resposta às doses de zinco aplicadas à área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Atributos químicos e físicos do solo da área experimental (0 – 0,20 m), antes da instalação dos experimentos. Pombal – PB, 2019.....	20
Tabela 2 –	Resumo da análise de variância para fitomassa fresca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019.....	24
Tabela 3 –	Resumo da análise de variância para fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019.....	25
Tabela 4 –	Resumo da análise de variância para produção relativa de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019.....	29
Tabela 5 –	Resumo da análise de variância para os teores e acúmulos de ferro na folha e nos grãos da planta de milho verde e teor no solo da área ao final do experimento. Pombal – PB, 2019.....	31
Tabela 6 –	Resumo da análise de variância para fitomassa fresca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco ao solo. Pombal – PB, 2019....	35
Tabela 7 –	Valores médios de fitomassa fresca dos componentes e total da espiga de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	35
Tabela 8 –	Resumo da análise de variância para fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco. Pombal – PB, 2019.....	36
Tabela 9 –	Valores médios de fitomassa seca das partições, espiga e total da planta de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019.....	36
Tabela 10 –	Resumo da análise de variância para produção relativa de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco. Pombal – PB, 2019.....	37
Tabela 11 –	Resumo da análise de variância para os teores e acúmulos de zinco na folha e nos grãos da planta de milho verde e teor de zinco no solo da área ao final do experimento. Pombal – PB, 2019.....	38
Tabela 12 –	Valores médios de teor e acúmulo de zinco nos grãos de milho verde. Pombal – PB, 2019.....	40

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 A cultura do milho verde.....	12
2.2 Ferro e zinco no solo.....	13
2.3 Importância do ferro e zinco nas plantas.....	15
2.4 Biofortificação de milho-verde.....	17
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1 Localização, clima e solo.....	19
3.2 Delineamento experimental e tratamentos.....	21
3.3 Instalação e condução dos experimentos.....	21
3.4 Variáveis analisadas.....	22
3.5 Análise estatística.....	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	24
4.1 Experimento I – Biofortificação agronômica com ferro.....	24
4.2 Experimento II – Biofortificação agronômica com zinco.....	35
5 CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS.....	43

1 INTRODUÇÃO

A fome ainda é um problema que afeta mais de 868 milhões de pessoas no mundo, principalmente em regiões áridas de países pobres e/ou em conflito. A solução encontrada para o problema foi justamente o uso de técnicas de melhoramento genético para introdução de cultivares, especialmente de milho, arroz e trigo, que fossem mais produtivos. Não obstante, a maior produtividade das culturas, observa-se redução da concentração nutricional dos alimentos produzidos, muito provavelmente em virtude do efeito de diluição dos elementos minerais (FAO, 2013).

Embora uma maior produção desses alimentos resolva, estritamente, o problema da fome, a sua ingestão não atende, minimamente, as quantidades de nutrientes requeridas pelo homem. Dessa forma, uma alimentação em que se consumam apenas alimentos com teores nutricionais baixos gera outro grave problema de saúde pública global, a fome oculta ou má nutrição.

A fome oculta é definida pela carência silenciosa de nutrientes, especialmente, Ferro (Fe), Zinco (Zn), Iodo (I) e vitamina A, essenciais ao bom desenvolvimento e funcionamento do corpo humano. Estima-se que aproximadamente cinco bilhões de pessoas no mundo possuam, em algum grau, deficiência de Fe e cerca de 1,5 bilhão de Zn, causando anemia, nanismo, dentre outras enfermidades, concorrendo assim, para manutenção da pobreza no mundo (GREBMER, 2014; VILAS BOAS, 2016).

De maneira geral, a baixa qualidade nutricional dos alimentos está associada à baixa disponibilidade dos nutrientes minerais nos solos, este último sendo afetado por diversos fatores, entre eles, o estado de atividade de prótons (pH), característica que afeta significativamente os teores de micronutrientes, como o Fe e Zn. No semiárido brasileiro a maioria dos solos, devido aos processos de baixa intemperização, possui caráter de alcalinidade, o que prediz uma condição de menor disponibilidade de micronutrientes para as plantas (MARTINS *et al.*, 2010).

Entre muitas alternativas para mitigar os efeitos da fome oculta destaca-se a biofortificação de alimentos, que se trata de uma técnica mais recente e que, aparentemente, tem se mostrado muito eficiente, sustentável e de boa aceitação por parte da população. A técnica de biofortificação consiste no enriquecimento nutricional dos alimentos ainda no campo, durante seu processo produtivo. No processo de biofortificação existem duas vias de trabalho, a citar, o melhoramento genético das culturas agrícolas (biofortificação genética) e/ou

pelo manejo do ambiente de cultivo com incrementos na fertilidade dos solos (biofortificação agronômica) (BORÉM; RIOS, 2011).

A biofortificação agronômica, em detrimento de outras, é uma ferramenta mais barata, acessível e de resultados em curtos períodos de tempo, alterando-se tão somente o manejo nutricional da cultura alvo. Esta técnica tem sido utilizada principalmente para o enriquecimento dos alimentos com micronutrientes, especialmente Fe e Zn.

Diversas culturas alvas têm sido estudadas no Brasil com foco na produção de alimentos biofortificados, tais como abóbora, arroz, batata-doce, feijão, feijão-caupi, mandioca, milho e trigo, muito embora os esforços nas investigações tenham se limitado, até então, à biofortificação genética dessas culturas. Na escolha da cultura agrícola, passível de biofortificação, deve se considerar alguns critérios, como a aceitação, o custo de aquisição e hábitos culturais alimentares de determinada parte da população a que se destinam estes alimentos biofortificados (NUTTI; CARVALHO; RODRIGUES, 2016).

Na região semiárida do Nordeste Brasileiro existe hábito cultural de consumo alimentar de milho na forma verde, seja de maneira cozida minimamente processada ou pela fabricação de pratos típicos, como pamonha. O milho consumido na forma verde se mostra uma alternativa eficiente de veicular, através da biofortificação agronômica, maiores teores de nutrientes minerais, sobretudo Fe e Zn, na alimentação da população carente do Semiárido Brasileiro (BRITO *et al.*, 2012).

Considerando-se que os estudos com a cultura do milho verde biofortificado agronomicamente são relativamente escassas, em particular no Semiárido do Brasil, ainda faltam informações sobre as recomendações de fertilizantes e de manejo para que os agricultores possam produzir esse alimento enriquecido com Fe e Zn no campo.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho foi incrementar, por meio da biofortificação agronômica, a qualidade nutricional do grão de milho verde a partir do manejo da fertilidade do solo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A cultura do milho verde

O milho verde (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais importantes no mundo, em face de sua produção, características químicas e nutritivas, destacando-se como excelente fonte energética, com alto teor de carboidratos, lipídios, proteínas e vitaminas encontradas nos grãos (BARBOSA *et al.*, 2015). A espécie pertence à família Poaceae, considerada, economicamente, a mais importante de interesse agrícola para produção de alimentos (GLIMNLACY; KAUFMAN, 2006). Provavelmente, o milho que tem como ancestral o teosinto, deve ter como centro de diversidade a região da América Central, especialmente o México (BORÉM; MIRANDA, 2013).

O milho verde é uma planta anual, de porte alto e ereto, cultivado em climas quentes. As flores masculinas formam uma panícula no topo da planta e as flores femininas ficam localizadas nas axilas das folhas do caule. Após a polinização, geralmente pelo vento, se desenvolvem longas espigas com grãos (sementes) das quais se encontram apenas uma ou duas em cada planta (BATEMAN *et al.*, 2006).

O milho verde é colhido no estágio reprodutivo “R3”, fase iniciada normalmente entre 12 a 15 dias após a polinização. Nesta fase, o grão se apresenta com uma aparência amarela e, no seu interior, um fluido de cor leitosa, no qual coincide com o início da transformação dos açúcares em amido. Nesse estágio ocorre a definição da densidade máxima dos grãos. Os grãos, na fase “R3”, apresentam rápida acumulação de matéria seca e possuem cerca de 80% de umidade. O crescimento a partir daí é devido à expansão e ao enchimento das células do endosperma com amido. Estresse hídrico nessa fase pode afetar a produção. O descarregamento e transporte de açúcares para os grãos em desenvolvimento ocorre via floema. (PEREIRA FILHO, 2002).

Segundo a FAO (2014), a produção mundial anual de milho consumido verde é de 9,6 milhões de toneladas, colhida em uma área de 1,1 milhões de hectares. No Brasil, o milho verde é considerado um tipo especial de milho, como o milho doce, milho pipoca, milho ceroso, milho branco, minimilho, etc., e dessa forma não tendo sido incluído nos levantamentos sistemáticos de safras agrícolas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (TSUNECHIRO; MIURA, 2012).

O milho verde é muito usado na culinária brasileira, especialmente como componente da dieta alimentar das camadas sociais mais pobres da população. Além do consumo direto do

grão verde, derivados como o óleo de milho, amido de milho, fubá e flocos de milho, dentre outros, tem se configurado como relevantes formas de seu uso nas mais distintas regiões do país (VELLOZO; FISBERG, 2010; BARBOSA *et al.*, 2015).

2.2 Ferro e zinco no solo

Os micronutrientes, de maneira geral, ocorrem em teores muito baixos no solo e são exigidos em baixas quantidades pelas plantas, haja vista terem como principal função, para a maioria deles, a de atuarem como catalisadores de reações enzimáticas, muitas vezes formando metaloenzimas. O ferro (Fe), entretanto, pode ser considerado uma exceção em alguns solos, sendo o micronutriente mais abundante na crosta terrestre, podendo constituir até 5% em volume total. Na maioria dos solos tropicais, caracterizados pelo alto grau de intemperização dos mesmos, os teores de Fe podem ser ainda maiores. Todavia é fato que os alimentos produzidos nestas condições possuem baixos teores de Fe. A explicação reside no efeito de diluição nutricional nas plantas, face aos crescentes aumentos de produtividade das culturas, na redução da absorção pelas plantas, provocada pela baixa disponibilidade do Fe em condições de alcalinidade do solo, característica geralmente encontrada em solos do semiárido brasileiro. Além disso, a redução na absorção de Fe pelas plantas pode ser atribuída à competição deste com outros nutrientes pelos mecanismos de transporte nas células (KABATA-PENDIAS, 2011).

O ferro inorgânico solúvel é representado por Fe^{2+} e Fe^{3+} e suas formas hidrolisadas FeOH^{2+} , Fe(OH)_2^+ e Fe(OH)_4^- . As três primeiras formas ocorrem em condições de acidez do solo, enquanto que Fe(OH)_4^- , em solos com pH acima de 7,0 (solos alcalinos). O Fe pode ainda ocorrer na forma reduzida (Fe^{2+}), considerada altamente solúvel, a ponto de ser verificado sintomas de toxidez por excesso deste elemento nas plantas, sobretudo em condições de anaerobiose do solo, como em determinados cultivos de arroz irrigado. Nestes casos, bactérias anaeróbicas usam o Fe como aceptor de elétrons provenientes de seu metabolismo, provocando a redução do Fe. Em solos de boa aeração, como os encontrados na maioria dos cultivos de espécies vegetais agrícolas, a concentração de Fe^{2+} raramente atinge valores tóxicos (ABREU *et al.*, 2007).

A dinâmica de Fe no solo é afetada pela baixa solubilidade dos compostos inorgânicos contendo este micronutriente, característica que limita fortemente na disponibilidade e absorção desta forma oxidada. Sua solubilidade é controlada pelo pH, sendo regida pela ação dos óxidos hidratados de Fe^{3+} , já que o Fe^{2+} representa quantidade relativamente baixa para o total de ferro

solúvel em solos aerados. Dessa forma tem-se que a atividade do Fe^{3+} decresce 1000 vezes para cada aumento de 1 unidade no pH do solo, tendo nível crítico a pH acima de 7,0, conforme equação (1) abaixo (INOCENCIO, 2014).



Ainda com relação a dinâmica do Fe no solo é observada a capacidade que o mesmo possui de formar complexos ou quelados com compostos orgânicos. Substâncias como os ácidos húmicos são insolúveis e podem adsorver irreversivelmente o Fe. Este “aprisionamento” do Fe pelo processo de complexação explica o uso de fertilizantes quelatados ou quelatizados, como destaque o Fe-EDTA, para a adubação com micronutrientes no solo. O Fe pode ser adsorvido em cargas negativas em coloides orgânicos, de óxidos e argilas em formas trocáveis e, dessa forma, constitui compartimento importante na reposição deste micronutriente na solução do solo. Além disso, o Fe pode reagir com espécies iônicas na solução do solo, formando a partir disso precipitados; assim, sua disponibilidade dependerá da solubilidade dos compostos químicos formados (FURTINI NETO *et al.*, 2001).

No Brasil, comumente, não tem sido adotado a filosofia de aplicação de Fe ao solo, visto a quantidade normalmente disponível ser considerada alta. Porém, em condições de elevada alcalinidade do solo faz-se necessário a aplicação de fertilizantes férricos solúveis (KUTMAN *et al.*, 2011).

O zinco (Zn) apresenta-se na solução do solo na forma de Zn^{2+} , que se trata também da forma com a qual é absorvida pelas raízes das plantas. Possui dinâmica no solo considerada complexa, tendo sua disponibilidade afetada pelo teor de matéria orgânica, pH, concentração de outros nutrientes, a citar o cobre, ferro, manganês e fósforo, além de teores de argila e do próprio sistema de produção agrícola. O íon fosfato reduz substancialmente a quantidade de Zn na solução do solo mediante reações de precipitação, formando compostos de baixa solubilidade, como o $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Estima-se que a concentração de Zn diminui cerca de 100 vezes para cada aumento de uma unidade de pH (FURTINI NETO *et al.*, 2001; BEHERA *et al.*, 2011).

A adsorção do Zn ocorre nos coloides orgânicos, óxidos de ferro, alumínio e manganês e parte desta adsorção encontra-se na forma específica pelos grupos OH^- das argilas silicatadas. Em solos com pH elevado ($\text{pH} > 7,0$) e/ou com baixo teor de matéria orgânica a deficiência de Zn pode ser considerada um grave problema. Solos altamente intemperizados, possuem grande capacidade na adsorção de Zn (HAN *et al.*, 2011).

Segundo Muner *et al.* (2011), a aplicação de Zn em solos deficientes deste micronutriente, promove o aumento da produtividade das culturas agrícolas, bem como enriquecimento nos teores de Zn das plantas. Nas pesquisas em biofortificação agrônômica com Zn a solubilidade do fertilizante é considerada critério importante para obtenção de sucesso com uso da técnica. Entre as fontes mais solúveis de Zn, de maior destaque pelo uso em estudos com biofortificação agrônômica, tem-se o quelato, o óxido, o carbonato, o cloreto, o oxissulfato, o sulfato de zinco, fertilizantes líquidos, além de soluções coquetéis com outros micronutrientes (KUTMAN *et al.*, 2011). De maneira geral, no Brasil, como fonte de Zn, tem utilizado predominantemente o sulfato de zinco devido sua alta solubilidade e baixo custo em relação à outras fontes.

Os fertilizantes contendo Zn podem ser aplicados na agricultura por via solo, foliar e por meio da incorporação junto às sementes. Quando o Zn é aplicado junto à semente das culturas agrícolas, as doses a serem aplicadas são reduzidas em relação a outros métodos de aplicação. Quando a aplicação do Zn for através do solo, doses maiores são utilizadas em detrimento de outras técnicas de aplicação, já que se deve considerar a interação entre o solo e o Zn, que invariavelmente, leva a retenção do micronutriente na fração sólida do solo, principalmente pelos óxidos de Fe, Manganês, titânio e alumínio (HAN *et al.*, 2011; STEINER *et al.*, 2011). Segundo Valladares *et al.* (2009), embora as concentrações de Zn nos solos sejam consideradas altas, somente uma pequena fração está disponível às plantas. Atualmente, na agricultura, a carência de estudos com potenciais fontes de Zn tem se configurado um sério problema no sucesso de ensaios de produtividade ou biofortificação agrônômica.

2.3 Importância do ferro e zinco nas plantas

Os micronutrientes são responsáveis por desempenharem funções vitais no metabolismo das plantas, seja como parte de compostos que atuam em processos metabólicos e fisiológicos, seja como ativadores enzimáticos. As demandas nutricionais são dependentes da produtividade colhida, da concentração de nutrientes nos grãos e na palhada. Para uma produção equivalente a 9 t ha⁻¹ de grãos, são exportados pelas plantas de milho, de maneira geral, cerca de 170 g de B, 110 g de Cu, 2.100 g de Fe, 340 g de Mn, 400 g de Zn e 9 g de Mo (MOREIRA, 2015).

Segundo Borges (2006), as quantidades de nutrientes absorvidas no início do ciclo do milho são pequenas, mas as concentrações de nutrientes no solo que circunda as raízes da planta naquela fase geralmente devem ser altas. Para Zn, o pico de absorção ocorre por volta dos 80 dias após a germinação e as quantidades requeridas seriam de 332 g ha⁻¹, para uma

produtividade de 5,9 t ha⁻¹ de grãos. No caso de Fe, o pico de absorção é mais tardio, ocorrendo por volta dos 100 dias, sendo a exigência em Fe correspondente a 1.610 g ha⁻¹. Assim sendo, comprova-se a importância da aquisição desses micronutrientes pela planta não só ao longo da fase vegetativa, mas também durante a fase reprodutiva.

O Fe possui grande capacidade redox (Fe²⁺, Fe³⁺), fato que o torna essencial nos processos de oxirredução durante o metabolismo das plantas. Atua junto à reação de uma grande variedade de enzimas. Além disso, faz parte como constituinte do tipo hemoproteína de enzimas fundamentais como, citocromo, catalase, peroxidases e leghemoglobina. O Fe faz parte de proteínas contendo enxofre (proteínas Fe-S), as quais são importantes nos processos metabólicos da planta. A ferredoxina é um representante de destaque deste grupo de proteínas Fe-S, participando da transferência de elétrons na fotossíntese, na fixação biológica do N₂, na redução do sulfato e na redutase do nitrato (NO₃⁻, NO₂⁻). Nas células das folhas deficientes em Fe, o número de ribossomos (local ativo de síntese de proteínas) é reduzido, indicando que o Fe atua na síntese de proteínas nas células vegetais (WIEDENHOEFT, 2006).

A principal função do Zn é a de atuar como grupo prostético de várias enzimas no metabolismo da planta, a citar: Desidrogenase Alcoólica – enzima que contém dois átomos de zinco, sendo um com função catalítica na redução do acetaldeído a etanol e o outro com função estrutural; Anidrase Carbônica - enzima que contém apenas um átomo de Zn e que catalisa a reação de hidratação do dióxido de carbono (CO₂). Esta enzima transforma o CO₂ nas células do mesófilo em HCO₃⁻ (ácido carbônico) que é o substrato para a enzima PEP-carboxilase (PEPcase) produzir compostos orgânicos C4 (4 carbonos - malato ou aspartato), os quais após o transporte até as células da bainha do feixe celular, recebem novamente a ação da anidrase carbônica que atua transformando o HCO₃⁻ em CO₂ que é substrato da enzima Ribulose Bifosfato Carboxilase Oxigenase (RuBisCO) (FARAGO, 1994).

Recentemente tem-se identificado uma classe de proteína contendo Zn (Metaloproteína-Zn) que age na replicação do DNA, transcrição e tradução e assim na regulação da expressão gênica, para além das funções já até então reconhecidas no metabolismo do RNA e DNA, na divisão celular e na síntese de proteínas. No processo de tradução, o Zn é requerido na metaloproteína-Zn para ligar-se ao gene específico e formar os complexos tetraédricos, juntamente com os aminoácidos da cadeia polipeptídica. O principal sintoma da deficiência de Zn nas plantas, a redução do alongamento do caule e formação de folhas pequenas, está relacionada aos distúrbios no metabolismo de auxinas, AIA em particular, produzidas a partir do triptofano. Em plantas de milho deficientes, a redução no alongamento está correlacionada

com o decréscimo no nível de AIA, e a retomada ao crescimento normal e aumento no nível de AIA pode ser observada após o suprimento do Zn a planta (TAVARES *et al.*, 2013)

2.4 Biofortificação de milho-verde

A biofortificação de alimentos teve início em 1993 pelo economista Howarth E. Bouis do Instituto Internacional de Pesquisa sobre Políticas Alimentares (IFPRI) quando à época apresentou-se, à comunidade científica, a ideia de genótipos de plantas visando maiores teores de minerais e vitaminas na parte comestível dos alimentos. Os produtos agrícolas (alimentos) são as fontes primárias de nutrientes para a população. A população mundial cresce rapidamente e estima-se que em 2050 atingirá cerca de nove bilhões de pessoas, tendo com isso, em consequência, a demanda crescente de produtos agrícolas acompanhando tal ritmo da população. Mais de 1,02 bilhões de pessoas não consomem alimentos em quantidades suficientes atualmente. Diante disso, a qualidade nutricional desses alimentos, bem como a fertilidade dos solos cultivados, pode ser prejudicada caso não se aplique manejo adequado nos processos de produção (CORBO, 2014).

Os vegetais biofortificados podem complementar as intervenções em andamento, constituindo-se uma maneira sustentável e de baixo custo para populações carentes. Os alimentos biofortificados são produzidos por meio de duas formas: a) genética: pelo melhoramento genético de plantas para extraírem maiores teores de um determinado nutriente alvo ou b) biofortificação agrônômica: por meio de incrementos na adubação via solo e/ou aplicação foliar e/ou pelo tratamento tópico de sementes. O programa mundial “HarvestPlus”, criado em 2005, é reconhecido como exemplo de sucesso na rede de biofortificação (HARVEST PLUS, 2017). O programa visa ao melhoramento das culturas de feijão, arroz, milho, mandioca, trigo e batata-doce. Além deste, temos a aliança AgroSalud como outro exemplo de sucesso, tendo como objetivo o de desenvolver melhores cultivares de arroz, milho, feijão e batata, eficientes no uso de insumos agrícolas, da água e de alto valor agrônômico (AGROSALUD, 2017).

No Brasil, através da rede de estudos “BioFORT”, culturas de trigo, arroz, feijão e feijão caupi (com teores elevados de Zn e Fe), mandioca, milho, batata doce e abóbora (com maior teor de β -caroteno, pró-vitamina A) são estudadas, visando à biofortificação (CARVALHO; NUTTI, 2013)

A base alimentar em muitos países traz o milho como componente importante da dieta dos povos, promovendo grandes benefícios à saúde, pelos seus compostos que atuam como

cofatores para enzimas antioxidantes. Tais compostos são: vitamina E e minerais, carotenoides e compostos fenólicos. As pesquisas no Brasil com milhos biofortificados avançam no sentido de desenvolver produtos ricos em Fe, Zn e pró-vitamina A para populações que apresentam carências nutricionais, tais como anemia ferropriva e hipovitaminose A. Sob condições de cultivos convencionais as cultivares de milhos apresentam baixos teores de carotenoides pró-vitamina A, com concentrações entre 0,13 a 2,7 para concentrações de β -caroteno, 0 a 1,3 para carotenos e 0,13 a 1,9 mmol.g^{-1} de β -criptoxantina (GONÇALVES *et al.*, 2015).

Graciano (2019) avaliou o efeito de diferentes doses de zinco via foliar em quatro cultivares de alface crespa, visando a biofortificação. Conclui-se que todas as cultivares de alface avaliadas podem ser consideradas biofortificadas, porém, a cultivar Thaís destacou-se por apresentar alto teor de zinco foliar, além de resultados satisfatórios para a maioria das características agronômicas avaliadas. Ademais, observou-se que as doses de 300 a 706 g ha^{-1} de zinco via foliar podem ser utilizadas para serem aplicadas na cultura da alface por proporcionarem plantas biofortificadas sem afetar a grande maioria das características produtivas da cultura.

Alves (2017), avaliando as formas de aplicação de Zn no feijão-caupi, observou que os teores de Zn nas folhas e grãos aumentaram com aplicação desse micronutriente, mesmo em solos com teores acima do nível crítico. Não foi observado incremento de produtividade em razão da aplicação de Zn, no entanto, observou-se relação inversa entre produtividade e concentrações de Zn nos grãos de feijão-caupi.

Reyes (2017) estudou o efeito de aplicações foliares de zinco (0,5; 1 e 1,5 kg ha^{-1}), em diferentes épocas, sobre parâmetros fisiológicos, produtivos e nutricionais de rúcula 'Folha larga', visando à biofortificação agronômica. Observou-se que não houve efeito dos fatores nem da interação nas variáveis fisiológicas, assim como na altura, área foliar e massa fresca da parte aérea. Doses de Zn afetaram os teores de N, Mn e P, enquanto para Cu e Fe não foram encontrados efeitos significativos.

Guimarães *et al.* (2005) analisaram diversas linhagens de milho QPM (milho de alta qualidade proteica) encontrando-se teores de Zn e Fe de 53,8 e 46,8 mg.kg^{-1} , respectivamente. Gugala e Zarzecka (2008) sugerem que o consumo diário de ferro para os seres humanos seja de no mínimo 10 mg. Para o zinco a ingestão recomendada é de 3 a 14 $\mu\text{g dia}^{-1}$, a depender da idade do ser humano (IOM, 2000).

Os trabalhos de pesquisas com biofortificação agronômicas na cultura do milho verde ainda são bastante incipientes (BOLIANI, 2012; CORBO, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização, clima e solo

Os experimentos foram realizados em condição de campo, de março a junho de 2018, em uma área comercial de produção, no município de Vieirópolis – PB, mesorregião do Sertão Paraibano, localizado à 06° 31' 47,91'' S e 38° 14' 29,42'' W, com altitude de 324 m.

De acordo com a classificação de Köppen (1956), o clima é semiárido quente e seco, com temperaturas elevadas durante o dia, amenizando a noite, apresentando variações anuais dentro de um intervalo 23 a 30° C, com eventuais picos mais elevados, principalmente durante o período de estação de estiagem. O regime pluviométrico, além de baixo é irregular, com médias anuais em torno de 900 mm (CPRM, 2005).

Os dados das variáveis climatológicas (temperatura mínima e máxima, evapotranspiração, umidade relativa do ar mínima e máxima), registrados durante a condução dos experimentos, encontram-se na Figura 1 e 2.

Figura 1 – Valores de temperatura mínima (tMin) e temperatura máxima (tMax) registrados no período de condução dos experimentos. Pombal – PB, 2019

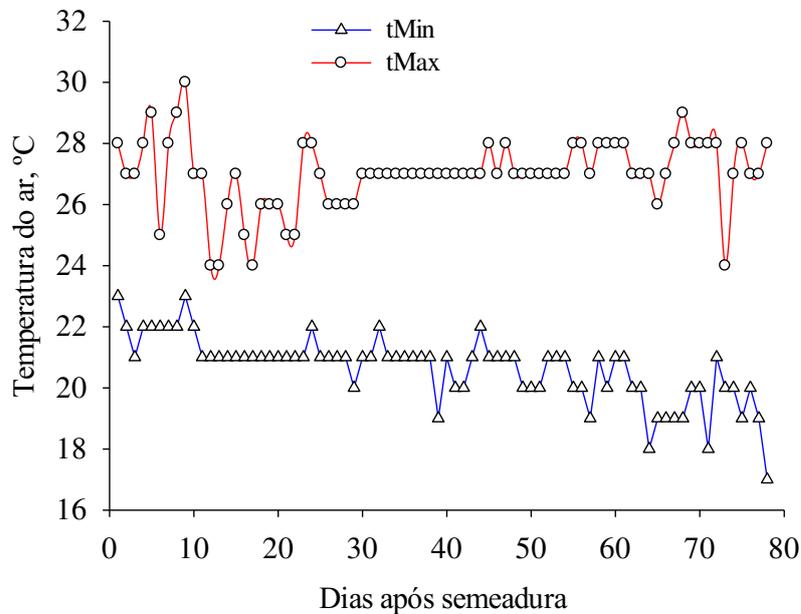
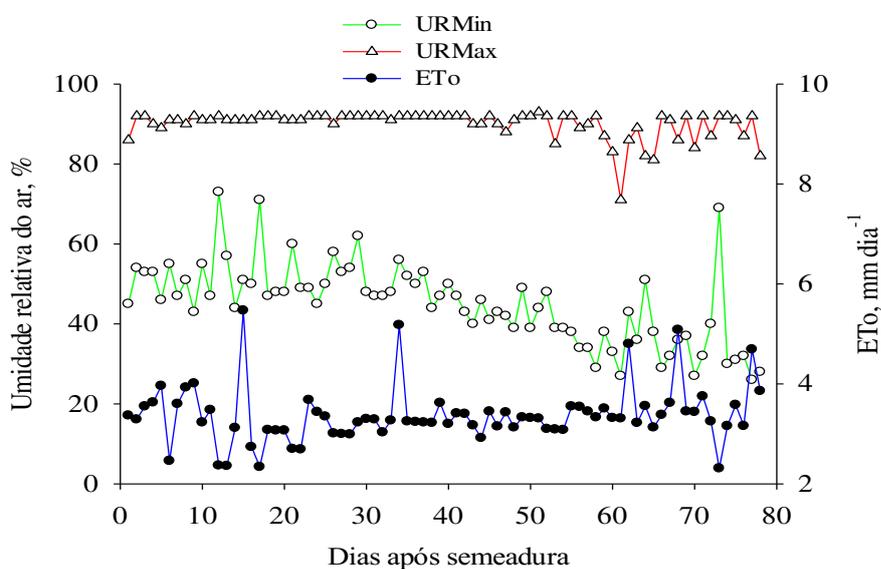


Figura 2 – Valores de umidade relativa mínima (URMin) e máxima (URMax) do ar e dados de evapotranspiração máxima (ETo) registrados no período de condução dos experimentos. Pombal – PB, 2019



O solo da área experimental está classificado como Luvissoilo Crômico (CAMPOS; QUEIROZ, 2006; SANTOS *et al.*, 2013). Antes da instalação dos experimentos o solo da área experimental foi amostrado na camada de 0 – 0,20 m de profundidade para a sua caracterização química e física, de acordo com metodologia contida em Embrapa (1997) (Tabela 1).

Tabela 1 – Atributos químicos e físicos do solo da área experimental (0 – 0,20 m), antes da instalação dos experimentos. Pombal – PB, 2019

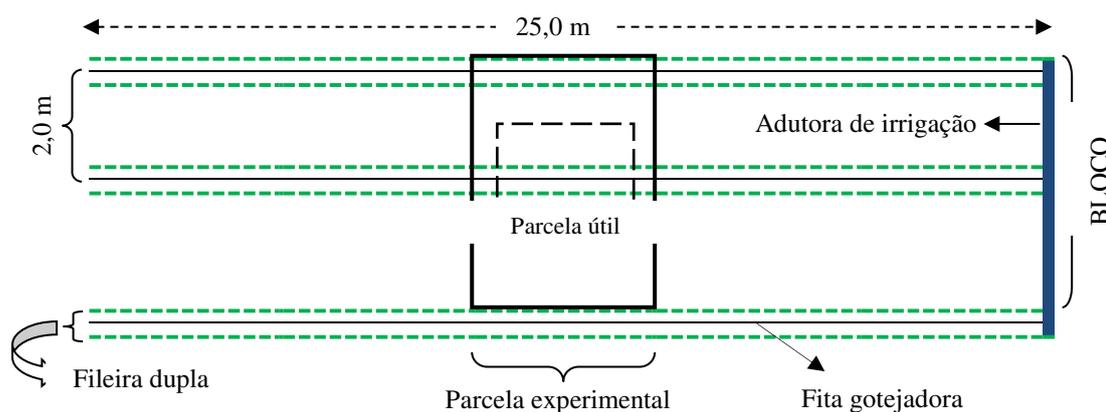
Atributo químico	Valor	Atributo físico	Valor
pH em água 1:2,5	7,23 Ae	Areia, g kg ⁻¹	567
Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	7,60 Mb	Silte, g kg ⁻¹	166
Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³	3,06 Mb	Argila, g kg ⁻¹	267
K ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,60 Mb	Classe textural	Franco Argilo Arenosa
Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,70	Densidade do solo, g cm ⁻³	1,38
Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00 Mbx	Densidade real, g cm ⁻³	2,81
H ⁺ + Al ³⁺ , cmol _c dm ⁻³	0,00 Mbx	Porosidade, m m ⁻³	0,51
CTC, cmol _c dm ⁻³	11,96 B		
V, %	100 Mb		
Mat. Org., g kg ⁻¹	39,50 M		
P, mg dm ⁻³	92,70 Mb		
Cu, mg dm ⁻³	0,23Mbx		
Fe, mg dm ⁻³	11,26 Bx		
Mn, mg dm ⁻³	30,80 A		
Zn, mg dm ⁻³	4,85 A		

K, Na, P, Cu, Fe, Mn, Zn: Extrator Mehlich 1; Al, Ca, Mg: Extrator KCl 1 M; Al + H: Extrator Acetato de Cálcio 0,5 M, pH 7,0; Mat. Org.: Digestão Úmida Walkely-Black. CTC = (SB + H⁺ + Al³⁺); Ae= alcalinidade elevada; Mbx= muito baixo; Bx = baixo; M= médio; B= bom; Mb = muito bom; A= alto; de acordo com Alvarez V. *et al.*, (1999).

3.2 Delineamento experimental e tratamentos

Foram realizados dois experimentos em delineamento de blocos casualizados. O Experimento I consistiu na aplicação de cinco doses de adubação com o micronutriente Fe, na forma de sulfato de ferro ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) e o Experimento II da aplicação de cinco doses de Zn na forma de sulfato de zinco ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), sendo aplicados totalmente via adubação de fundação do solo, ambos nas seguintes doses: 0; 2,5; 5,0; 7,5 e 10,0 kg ha^{-1} , com quatro repetições em cada Experimento. As doses foram estabelecidas a partir de recomendação de Freire *et al.* (1999). A parcela experimental de ambos os Experimentos foi constituída por três fileiras duplas de plantio com 5,0 m de comprimento, totalizando-se aproximadamente 100 plantas em 30 m^2 de cada parcela. A parcela útil foi constituída pela fileira dupla central, desprezando-se 0,5 m de cada extremidade, conforme figura 3.

Figura 3 – Desenho esquemático da parcela experimental utilizada nos experimentos. Pombal – PB, 2019



3.3 Instalação e condução dos experimentos

O preparo do solo da área experimental foi feito através de uma aração a 0,20 m de profundidade. O milho híbrido triplo, AG 1051[®], foi semeado diretamente no campo, sob sistema de fileiras duplas de plantio, com espaçamento de 0,40 m dentro da fileira dupla, 0,30 m entre plantas na linha de plantio e 2,0 m entre os centros de cada fileira dupla, obtendo-se uma densidade populacional estimada em 33.333 plantas ha^{-1} . Escolheu-se esse híbrido de milho verde em razão de ter grande aceitabilidade no mercado regional e pelas excelentes características agrônômicas, como ciclo semiprecoce, alto rendimento e maior período disponível para colheita (ALBUQUERQUE *et al.*, 2008; MAGALHAES *et al.*, 2014). A

semeadura foi realizada em 28 de março de 2018, a uma profundidade média de 0,03 m, com duas sementes por cova na linha de plantio, na qual, posteriormente, efetuou-se o desbaste na fase vegetativa “V3” (três folhas definitivas), permanecendo apenas uma única plântula por cova.

Para irrigação da área de cultivo foi utilizada água de baixa salinidade ($0,1 \text{ dS m}^{-1}$), utilizando-se sistema de irrigação localizado, pressurizado por eletrombra trifásica, com uso de uma única fita gotejadora, modelo Taldrip®, marca NaanDanJain®, diâmetro nominal de 17 mm, emissores espaçados a 0,3 m e vazão de $1,0 \text{ L h}^{-1}$ a 100 KPa de pressão nominal, ao centro de cada fileira dupla. A adubação de cobertura foi feita seguindo-se recomendação de Freire *et al.* (1999), com uso de ureia como fonte solúvel de fertilizante nitrogenado, aplicada à área de cultivo mediante a água de irrigação (fertirrigação), sendo injetado ao sistema através de equipamento do tipo venturi. A lâmina de irrigação foi determinada com base nas estimativas de evapotranspiração de referência pelo método de Hargreaves e Samani (HARGREAVES, 1974), com auxílio do *software* Sistema para Estimativa de Evapotranspiração (SEVAP) (SILVA *et al.*, 2005); para tanto instalou-se termômetro analógico de bulbo seco, ao lado da área de cultivo, para registro das temperaturas diárias máximas e mínimas durante a condução dos experimentos, sendo as leituras obtidas às 9:00 horas.

O manejo químico de plantas daninhas na área experimental foi feito dentro do período crítico de competição, compreendido entre as fases vegetativas “V3” e “V12” (terceira e décima segunda folha definitiva) da cultura do milho, seguindo-se recomendação de Vargas *et al.* (2006), utilizando-se aplicação pulverizada com equipamento costal de 20 L de capacidade de calda à pressão constante, à base do herbicida seletivo de ação sistêmica, Atrazina Nortox 500 SC®, tendo o 6-chloro-N²-ethyl-N⁴-isopropyl-1,3,5-triazine-2,4-diamine (Atrazina), 500 g L^{-1} , como princípio ativo, na dosagem de $5,0 \text{ L ha}^{-1}$ de produto comercial ($2,5 \text{ L ha}^{-1}$ de Atrazina).

O manejo químico da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith) foi feito sempre que verificado a presença dos primeiros insetos na área, com pulverizações a partir da fase vegetativa “V3”, à base do inseticida Lannate® BR, tendo como princípio ativo o S-methyl N-methylcarbamoyloxy) thioacetimidate (Metomil), 215 g L^{-1} , na dosagem de $0,6 \text{ L ha}^{-1}$ de produto comercial (129 g ha^{-1} de Metomil) (MAPA, 2017).

3.4 Variáveis analisadas

Aos 78 dias, após a semeadura, por ocasião da colheita das espigas de milho verde, em cada experimento, três plantas da parcela útil de cada unidade experimental foram cortadas

rente ao solo, separadas em caule, folhas, palha de espiga, sabugo e grãos verdes. Foram mensuradas a fitomassa verde (g planta^{-1}) de palha de espiga, sabugo, grãos e total da espiga, através de balança digital semianalítica Bel[®], modelo S1002, com resolução em 0,01 gramas. Posteriormente, os materiais do caule, folhas, e palha da espiga de cada repetição foram trituradas em máquina forrageira, marca Nogueira, modelo DPM 2, para redução do tamanho das partes e, conseqüente, melhoria no processo de secagem. Em seguida, todas as partições da planta de milho foram secas em estufa de circulação forçada de ar, à ± 65 °C por 72 horas para determinação da fitomassa seca (g planta^{-1}) de caule, folhas, palha de espiga, grãos, sabugo, total e fitomassa seca relativa dos componentes.

Amostras de matéria seca de folhas e grãos foram trituradas em moinho tipo Willey para a determinação dos teores de Fe e Zn (mg kg^{-1}) no extrato resultante da digestão nítrico-perclórica dos tecidos, através de espectrometria de absorção atômica, conforme metodologia descrita em Malavolta *et al.*, (1997). Com base nos teores nutricionais de Fe e Zn nas folhas e grãos e na fitomassa seca produzida foram estimados os acúmulos para cada nutriente, em cada parte, de acordo com a expressão: $\text{mg planta}^{-1} \text{ nutriente} = (\text{teor do nutriente na fitomassa seca} (\text{mg kg}^{-1}) \times \text{fitomassa seca da parte} (\text{g planta}^{-1})) / 1000$.

Ao final dos experimentos amostras de solo, na camada 0 - 0,20 m de profundidade foram coletadas na área útil de cada parcela experimental para determinação dos teores de Fe e Zn (mg dm^{-3}), de acordo com metodologia contida em Embrapa (1997).

3.5 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância para verificar diferença significativa pelo teste F ($P < 0,05$), por meio do auxílio do *software* estatístico SISVAR[®], versão 5.6. (FERREIRA, 2000). Quando significativos, os dados foram submetidos à ajustes a funções polinomiais, considerando-se as características avaliadas como variáveis dependentes e as doses de micronutrientes estudadas como variável independente, através do *software* Table Curve 2D, versão 5.01 (Systat Software Inc., 2002).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento I – Biofortificação agronômica com ferro

As diferentes doses de ferro estudadas não proporcionaram incrementos significativos, de acordo com teste F ($P \leq 0,05$), nas características de fitomassa fresca da palha da espiga, de grãos e total da espiga. Os valores médios para estas variáveis foram de 152,65; 155,25 e 414,63 g planta⁻¹, respectivamente. Resultados semelhantes foram encontrados por Assmann (1993), ao estudar o efeito da aplicação de ferro no solo sob os parâmetros de biomassa da planta de milho. Dentre os componentes de fitomassa fresca, apenas o sabugo, foi influenciado pela adubação de ferro (Tabela 2), evidenciando que este componente estrutural deva ser mais sensível às alterações impostas pelos maiores teores de ferro extraídos pela planta.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância para fitomassa fresca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019

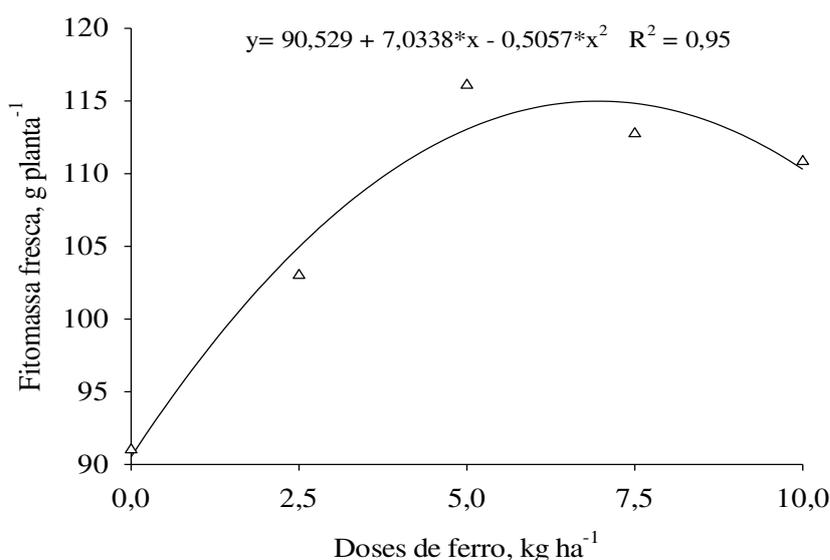
FV	GL	Quadrados Médios			
		FFP	FFG	FFS	FFE
Trat.	4	155,96 ^{ns}	176,51 ^{ns}	401,90 ^{**}	1705,69 ^{ns}
Bloco	3	895,33	290,59	193,43	3027,34
Resíduo	12	299,51	888,45	48,97	1014,74
Média	-	152,65	155,25	106,73	414,63
CV (%)	-	11,34	19,20	6,56	7,68

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; FFP – Fitomassa fresca de palha da espiga; FFG – Fitomassa fresca de grão; FFS – Fitomassa fresca de sabugo; FFE – Fitomassa fresca da espiga.

A fitomassa fresca de sabugo apresentou, de acordo com as doses de ferro aplicadas ao solo, comportamento descrito por função de ajuste quadrático, com resposta máxima de 114,98 g planta⁻¹ de fitomassa, obtida na dose estimada de 6,95 kg ha⁻¹ de ferro (Figura 4). Maiores doses de ferro, após ponto máximo de acúmulo de fitomassa fresca, promoveram redução na fitomassa fresca de sabugo; observou-se queda média de 1,33% nesta característica para cada kg de ferro ha⁻¹ aplicado após este ponto. A xilana, principal componente do sabugo de milho, apresenta em sua estrutura um alto percentual de polissacarídeos (60%), assim como 70% de atividade ligante de íons de ferro, de onde se pode inferir sua capacidade de ligação com íons hidrogênio da água (SILVA *et al.*, 1998); Isso permitiria maiores acúmulos de fitomassa fresca em função das doses de ferro aplicadas ao solo, até ponto de máximo, a partir do qual, como observado, as maiores concentrações de ferro no solo, que provavelmente induzem a maiores conteúdos do micronutriente no sabugo, causam efeito deletério sob a acumulação de massa

nesta partição da planta. Este comportamento quadrático de resposta converge com resultados apresentados por Magalhaes *et al.* (2014), que ao estudarem as características de fitomassa fresca da cultura do milho AG 1051 em função de concentrações de micronutrientes na adubação de solo, observaram respostas quadráticas nas maiores doses utilizadas.

Figura 4 – Fitomassa fresca de sabugo de milho verde em respostas às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



As crescentes doses de ferro proporcionaram diferentes respostas, pelo teste F, com relação às características avaliadas de fitomassa seca na planta de milho verde (Tabela 3). Observou-se diferença significativa ($P \leq 0,05$) nas variáveis de fitomassa seca de grãos, sabugo, espiga e total da planta. Para as demais características não se observou efeito significativo do uso das doses de ferro na biofortificação agrônômica de milho verde, o que segue mesmo comportamento observado para fitomassa fresca destas partições.

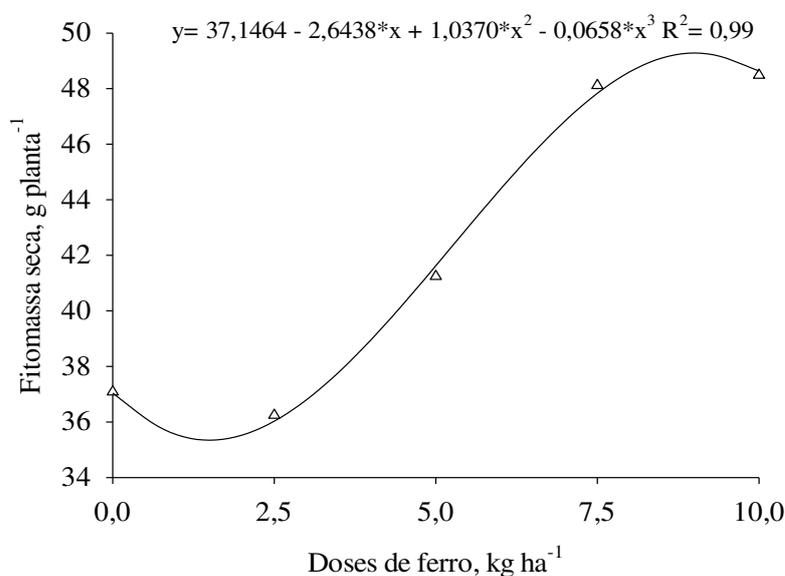
Tabela 3 – Resumo da análise de variância para fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios						
		FSC	FSF	FSP	FSG	FSS	FSE	FST
Trat.	4	298,95 ^{ns}	20,10 ^{ns}	17,37 ^{ns}	137,08*	44,56**	431,58**	1527,07*
Bloco	3	131,94	21,84	23,70	52,50	4,05	153,35	181,78
Erro	12	153,60	13,35	10,58	35,06	1,94	63,19	361,00
Média	-	117,94	57,77	34,07	42,23	31,83	108,14	283,86
CV (%)	-	10,51	6,33	9,55	14,02	4,38	7,35	6,69

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; FSC – Fitomassa seca de caule; FSF – Fitomassa seca de folha; FSP – Fitomassa seca de palha da espiga; FSG – Fitomassa seca do grão; FSS – Fitomassa seca de sabugo; FSE – Fitomassa seca da espiga; FST – Fitomassa seca total.

Com relação à fitomassa seca de grão, observou-se comportamento quadrático (Figura 5), com resposta máxima de 49,33 g planta⁻¹ na dose estimada de 9,01 kg ha⁻¹, valor que se aproxima dos resultados encontrados por Borges (2006), que ao estudar a marcha de absorção de nutrientes e acúmulo de matéria seca para dois híbridos de milho, observou, aos 85 dias após a emergência, 56,63 g planta⁻¹ de fitomassa seca de grãos. O ferro atua nas reações de transferência de elétrons durante a fotossíntese e atua na biossíntese de metalporfirina e, através deste, da formação da clorofila e de outras porfirinas (citocromo, catalases, peroxidases) (EPSTEIN; BLOOM, 2006), o que fez com as plantas de milho submetidas às maiores disponibilidades deste micronutriente no solo tivessem maior desempenho agrônomo, resultando em ganho de fitomassa seca nos grãos. A fitomassa seca de grãos permite inferência sobre a produtividade da cultura, além de ser aspecto importante para biofortificação agrônomo por influenciar diretamente os teores de acúmulos dos nutrientes alvos.

Figura 5 – Fitomassa seca de grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

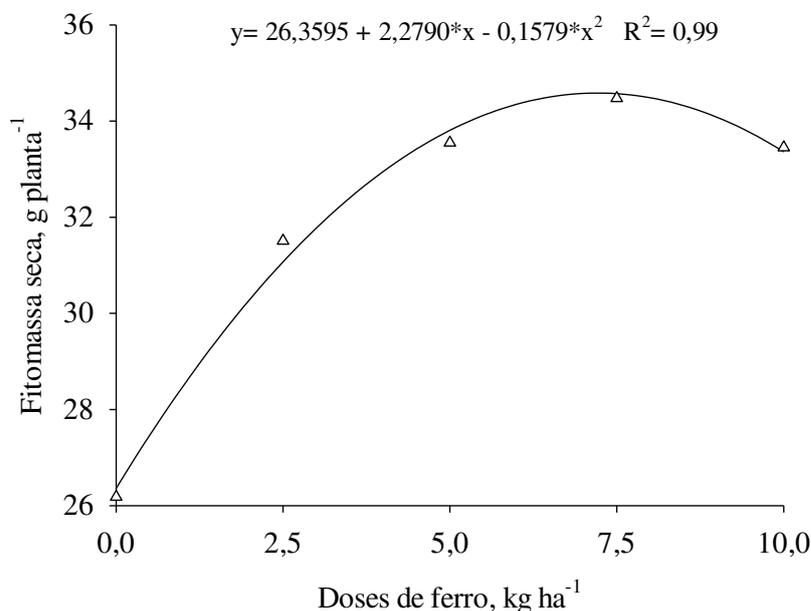


Com relação à fitomassa seca de sabugo, semelhante ao observado para fitomassa fresca desta parte, obteve-se comportamento de resposta quadrática em detrimento das doses de ferro estudadas, com valor máximo de 34,58 g planta⁻¹ e dose máxima de ferro estimada em 7,21 kg ha⁻¹ (Figura 6). Doses de ferro acima do nível máximo causaram redução de 1,27%, em média, para cada kg de ferro ha⁻¹ aplicado, em prejuízo do acúmulo de fitomassa seca de sabugo. Estes resultados se justificam, com base na literatura encontrada e conforme citado para fitomassa

fresca de sabugo, devido à atividade biológica dos polissacarídeos constituintes do sabugo, as xilanas.

Considerando que, Fabrício *et al.* (2012) encontraram conteúdo de ferro no sabugo em 0,017% da composição centesimal, estima-se, para o presente trabalho, que o acúmulo médio de ferro desta parte tenha sido de 5,41 mg planta⁻¹. Sousa *et al.* (2010), encontraram para o milho AG 1051 cultivado à campo sob condições irrigadas no semiárido, acúmulo de ferro no sabugo de 6,03 mg planta⁻¹, corroborando com as estimativas do presente trabalho. Neumann *et al.* (2005) obtiveram resultados semelhantes com relação à fitomassa seca de sabugo, onde observaram relação de resposta quadrática para esta variável em função de adubação na cultura do milho, este colhido em período anterior à maturação fisiológica. Borges (2006) encontrou, para dois híbridos de milho, valores médios de 38, 11 g planta⁻¹ de fitomassa seca de sabugo, aos 85 dias após emergência.

Figura 6 – Fitomassa seca de sabugo de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Na fitomassa seca de espiga e total (Figura 7 e 8), observou-se ajuste linear de resposta em função das doses de ferro aplicadas ao solo, com valores máximos de 119,09 e 306,78 g planta⁻¹, respectivamente. Isso se deve às respostas observadas com relação à fitomassa seca dos componentes estruturais, sobretudo grãos e sabugo (Figura 5 e 6), além da fitomassa seca de caule e folhas terem apresentado tendência de crescimento linear, embora estes últimos não difiram, entre si, pelo teste F. Moreira *et al.* (2015), ao avaliar o acúmulo de matéria seca e de

nutrientes na cultura do milho verde AG 1051, observou valor estimado de 85,65 g planta⁻¹ de fitomassa seca de espiga, enquanto a fitomassa seca total foi de 220,65 g planta⁻¹, o que representa diferença de 28,07% em relação aos resultados encontrados no presente trabalho. Tal divergência pode ser atribuída aos efeitos positivos da biofortificação agrônômica com ferro sob as características produtivas do milho verde (FAQUIN, 2005; MALAVOLTA, 2006).

Figura 7 – Fitomassa seca de espiga de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

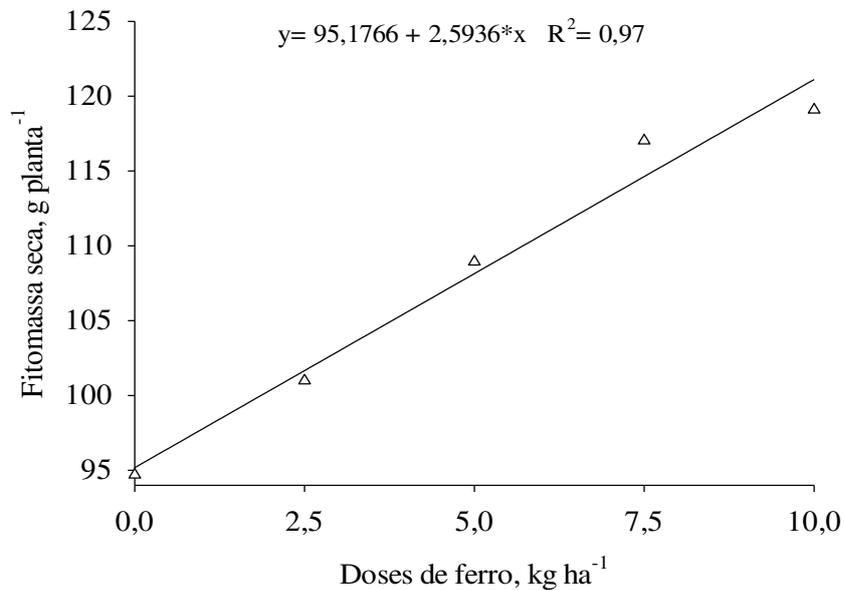
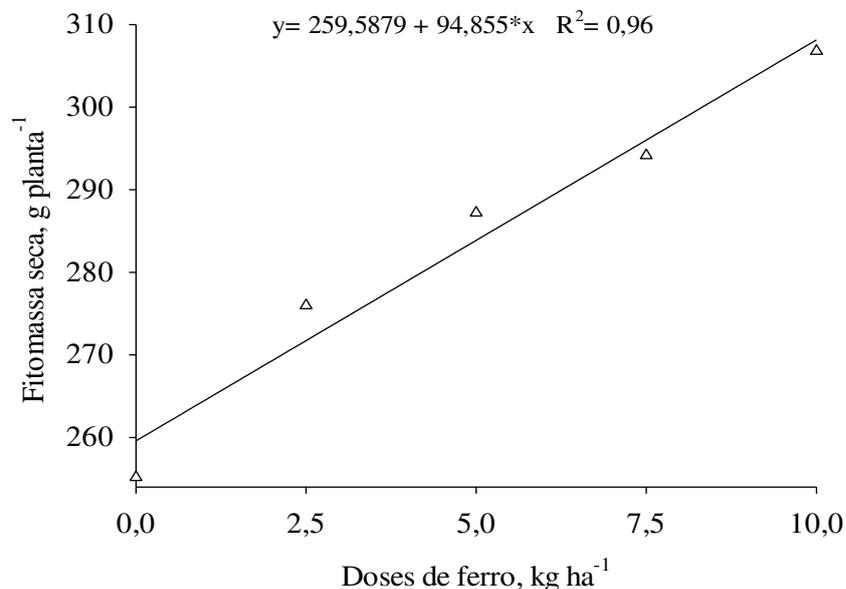


Figura 8 – Fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



De acordo com a análise de variâncias para os dados de fitomassa seca dos componentes estruturais da planta de milho, observou-se efeito significativo, pelo teste F, para fitomassa de folha e sabugo. Para os demais componentes da fitomassa seca da planta, não foram observados resultados significativos ($P \leq 0,05$) em resposta aos tratamentos (Tabela 4).

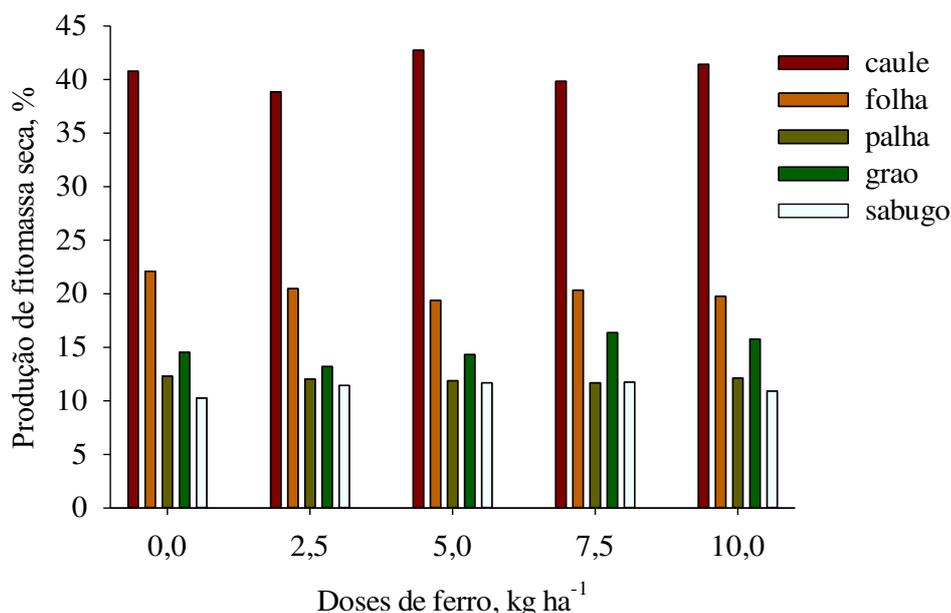
Tabela 4 – Resumo da análise de variância para produção relativa de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de ferro. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios				
		PFSC	PFSP	PFSP	PFSG	PFSS
Trat.	4	6,62 ^{ns}	5,43 ^{**}	0,22 ^{ns}	6,21 ^{ns}	1,55 ^{**}
Bloco	3	16,39	1,24	2,72	4,01	0,30
Erro	12	5,49	0,80	0,66	3,62	0,26
Média	-	41,52	20,41	12,01	14,83	11,21
CV (%)	-	5,64	4,41	6,80	12,82	4,60

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; PFSC – Percentual de fitomassa seca de caule; PFSP – Percentual de fitomassa seca de folha; PFSP – Percentual de fitomassa seca de palha da espiga; PFSG – Percentual de fitomassa seca do grão; PFSS – Percentual de fitomassa seca de sabugo.

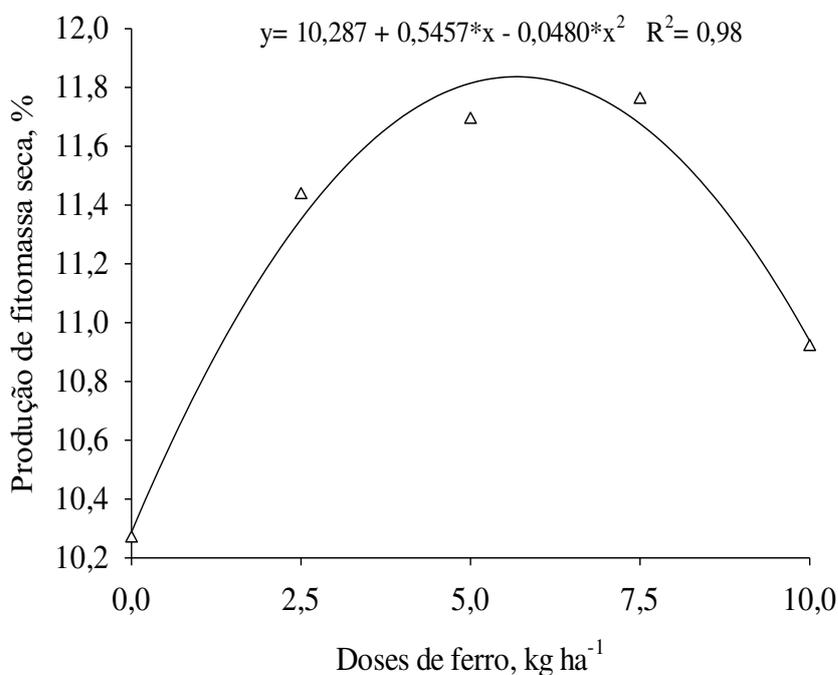
Na análise da composição física percentual estrutural da planta (Figura 9), observou-se a seguinte ordem decrescente de fitomassa seca relativa dos componentes da planta de milho: caule > folha > grão > palha > sabugo.

Figura 9 – Participação percentual (%) do ‘caule’, ‘folha’, ‘palha’, ‘grão’ e ‘sabugo’ na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



A fitomassa seca de caule foi, em média, duas vezes maior que a fitomassa seca de folha. Assmann (1993), estudando a produção de fitomassa seca do caule do milho, não observou efeito significativo sob esta partição, em função de doses de ferro no solo entre 10 e 100 kg ha⁻¹. A produção de fitomassa seca relativa do componente ‘sabugo’ (Figura 10) apresentou comportamento de resposta quadrática com o aumento das doses de ferro, obtendo máximo acúmulo na dose estimada em 5,67 kg ha⁻¹, corroborando com os resultados de fitomassa fresca e seca absoluta desta partição. Dados de Von Pinho *et al.* (2009), revelam que o sabugo contribui com 9,3% da fitomassa seca total da planta de milho.

Figura 10 – Proporção de fitomassa seca de sabugo (%) na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Na tabela 5 encontram-se os resultados da análise de variância para os teores e acúmulos de ferro na folha e nos grãos da planta de milho verde e teor no solo da área ao final do experimento. Observou-se efeito significativo ($P \leq 0,01$), pelo teste F, para todas as variáveis citadas.

Tabela 5 – Resumo da análise de variância para os teores e acúmulos de ferro na folha e nos grãos da planta de milho verde e teor no solo da área ao final do experimento. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios				
		TFeF	AcFeF	TFeG	AcFeG	TFeS
Trat.	4	1326,29**	6,87**	5,90**	1,26**	3,34**
Bloco	3	248,51	0,074	0,74	0,30	1,01
Erro	12	58,36	0,43	0,64	0,14	0,48
Média	-	120,05	6,92	23,10	2,94	4,90
CV (%)	-	6,36	9,51	3,47	13,07	14,18

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ns – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; TFeF – Teor de ferro na folha; TFeG – Teor de ferro no grão; AcFeF – Acúmulo de ferro na folha; AcFeG – Acúmulo de ferro no grão; TFeS – Teor de ferro no solo.

O comportamento do teor e acúmulo de ferro na folha, em relação às doses estudadas, foi descrito por curvas de resposta linear crescente (Figura 11 e 12), onde se observa os pontos máximos de acumulação de 141,57 mg kg⁻¹ e 8,48 mg planta⁻¹, respectivamente. Para o teor de ferro na folha (Figura 11) observou-se incremento de 3,80% para cada kg de ferro acrescentado na adubação de solo em relação à dose testemunha, embora ressalta-se que, para todas as doses testadas, os teores de ferro na folha ficaram dentro da faixa de suficiência da cultura do milho (20 – 250 mg kg⁻¹), conforme o descrito em Martinez *et al.* (1999). Quanto ao acúmulo de ferro na folha (Figura 12), o valor de acréscimo, em relação à dose testemunha, foi superior a variável anterior; observou-se aumento de 4,85% para cada kg de ferro incrementado na adubação.

Figura 11 – Teor de ferro na folha de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

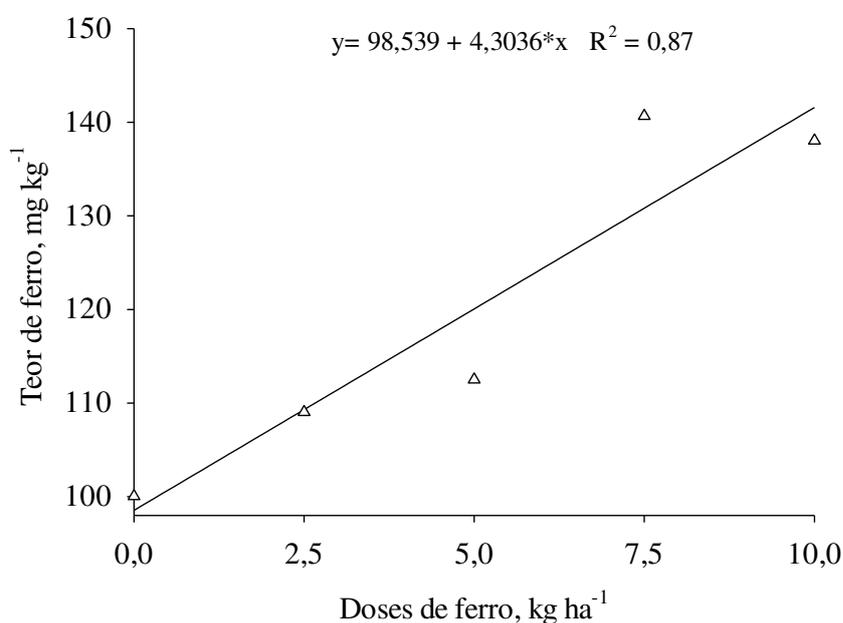
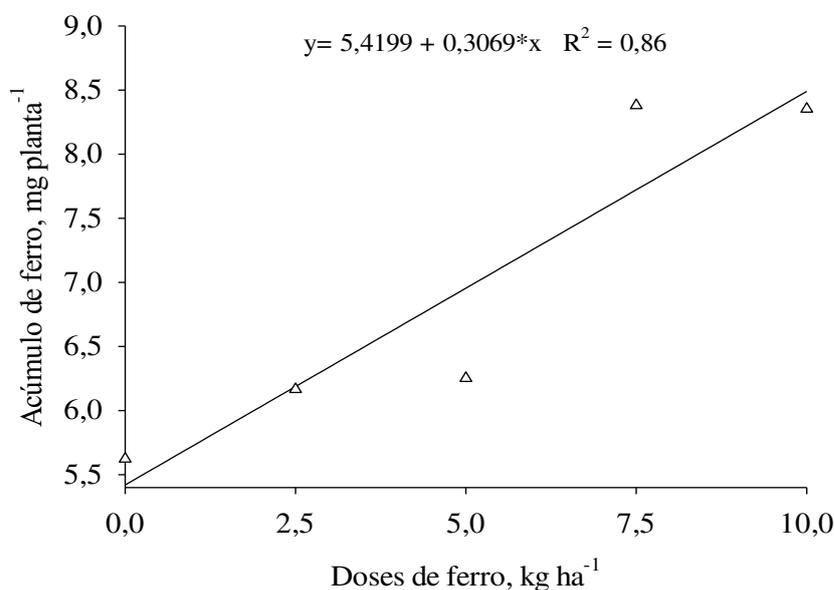


Figura 12 – Acúmulo de ferro na folha de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Gott (2013) estudando os teores foliares adequados de micronutrientes em lavouras comerciais de milho na região do Alto Paranaíba, MG, concluíram que para o milho, o nível crítico de ferro é de 163,2 mg kg⁻¹, valor muito acima da maior resposta observada no presente trabalho para maior dose de ferro testada. Ainda segundo este mesmo autor, a faixa de suficiência fica entre 122,5 e 219,7 mg kg⁻¹, o que coloca apenas as doses de 7,5 e 10,0 kg ha⁻¹ de ferro como capazes de promover nutrição adequada quanto aos teores foliares do milho.

As figuras 13 e 14 apresentam os resultados dos teores e acúmulos de ferro na fitomassa seca de grãos. Foram observados efeitos significativos ($P \leq 0,05$) do uso das doses de ferro na biofortificação agrônômica de milho verde (Tabela 5). O teor e acúmulo de ferro nos grãos cresceram linearmente em relação à testemunha (0,0 kg de ferro ha⁻¹). A curva de resposta de acúmulo de ferro nos grãos não seguiu a tendência de comportamento linear crescente observada para a fitomassa seca desta variável. A diminuição do teor e acúmulo de ferro no grão com o uso de doses na adubação do solo deve-se ao efeito de diluição desse nutriente na planta, caracterizado quando a taxa de crescimento relativo de fitomassa seca é superior à taxa de absorção relativa do nutriente (MAIA *et al.*, 2005).

Queiroz *et al.* (2011) avaliaram os teores de ferro em 22 linhagens de milho selecionadas pelo Programa de Melhoramento Genético da Embrapa Milho e Sorgo; esses autores constataram variabilidade genética significativa nos teores de ferro em grãos de milho, com valor mínimo e máximo de 13 e 36 mg kg⁻¹, respectivamente (24 mg kg⁻¹, em média). Sena (2010), ao estudar a variabilidade, a interação genótipos x ambientes e a estabilidade do teor de

ferro nos grãos de variedades comerciais de milho, observou que o efeito ambiental exerceu influência sobre este micronutriente, devido, provavelmente, às diferenças nos atributos químicos do solo e às adubações aplicadas. Ainda segundo este autor, o teor mínimo de ferro foi de $14,8 \text{ mg kg}^{-1}$, máximo de $19,2 \text{ mg kg}^{-1}$ e médio de $17,25 \text{ mg kg}^{-1}$. Na literatura, a variação apresentada é bem ampla, indo de 10 a 188 mg kg^{-1} (BANZIGER; LONG, 2000; MAZIYA-DIXON *et al.*, 2000; BITYUTSKII *et al.*, 2002; OIKEH *et al.*, 2003a; OIKEH *et al.*, 2003b; LONG *et al.*, 2004; FAQUIM, 2005; GUIMARÃES *et al.*, 2005; MENKIR, 2008).

No presente trabalho, a média apresentada pelo híbrido AG 1051 para teor de ferro no grão ($23,10 \text{ mg kg}^{-1}$) ficou muito abaixo dos valor-alvo (70 mg kg^{-1}) estabelecidos pelo Harvest Plus (SENA, 2010). Para o ferro, que é um nutriente com forte regulação genética na planta, a prática de biofortificação agrônômica apresentou pouco efeito sobre as concentrações do elemento nos grãos, corroborando com as afirmações de Moraes *et al.* (2009). A literatura tem demonstrado que essa baixa ou ausência de influência da biofortificação agrônômica nos teores de ferro nos grãos é devida à rápida conversão deste elemento em formas indisponíveis quando aplicado ao solo, sobretudo em casos de solos de elevada alcalinidade como é o caso do presente trabalho, e à sua baixa mobilidade no floema da planta. Além da adubação no solo, a biofortificação agrônômica com ferro mediante adubação foliar também tem apresentado baixa eficiência (RENGEL *et al.*, 1999; CAKMAK, 2008).

Figura 13 – Teor de ferro no grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

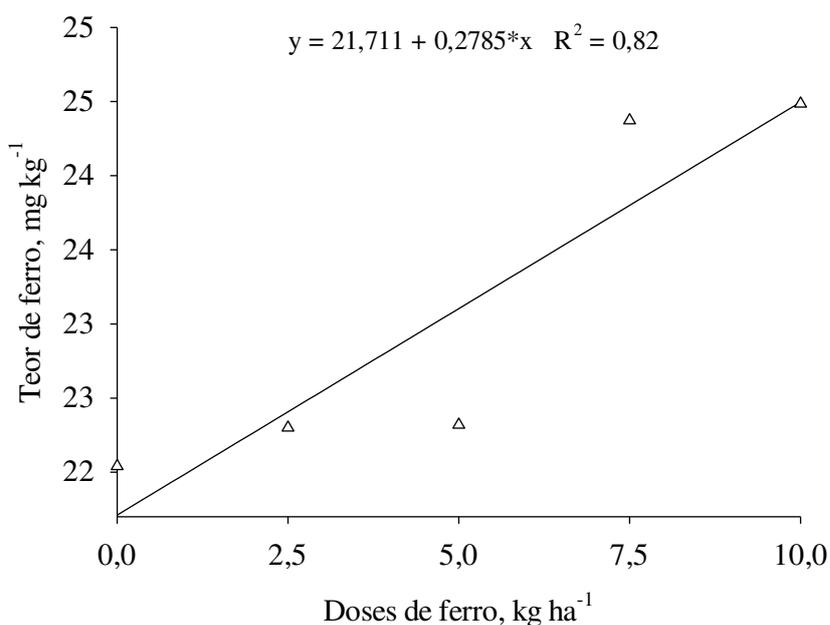
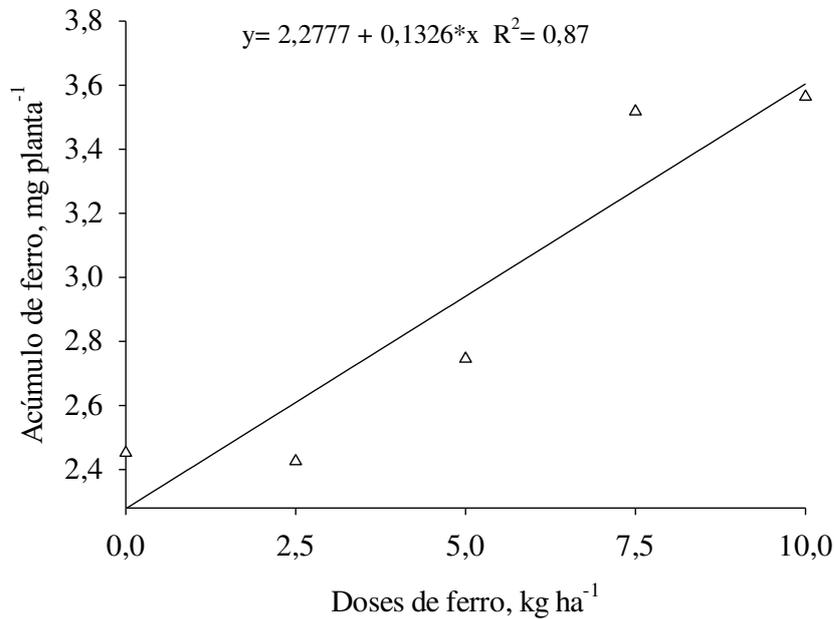
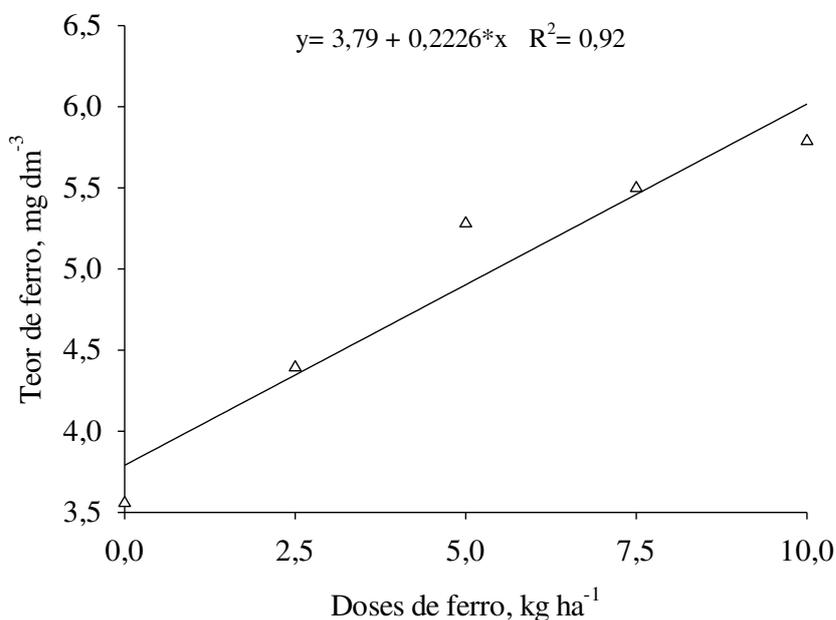


Figura 14 – Acúmulo de ferro no grão de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Para o teor de ferro no solo, observou-se diferença significativa ($P \leq 0,05$) de acordo com a análise de variâncias dos dados (Tabela 5). Foi obtida resposta linear crescente em função do aumento das doses de ferro na adubação, com valor máximo estimado na maior dose empregada (Figura 15).

Figura 15 – Teor de ferro no solo da área de cultivo de milho verde em resposta às doses de ferro aplicadas. Pombal – PB, 2019



4.2 Experimento II – Biofortificação agrônômica com zinco

De acordo com os resultados da análise de variância dos dados de produção dos componentes de fitomassa fresca da planta de milho verde submetidas às diferentes doses de zinco no solo, não foram influenciadas significativamente, pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 6). As médias dos componentes de fitomassa fresca encontram-se na Tabela 7. A ausência de resposta significativa do milho à aplicação de zinco sob estas características pode ter ocorrido devido ao alto teor médio inicial deste nutriente disponível no solo da área experimental ($4,85 \text{ mg dm}^{-3}$), valor considerando 323,33% acima do nível crítico deste micronutriente (Tabela 1) (ALVAREZ V. *et al.*, 1999; BELLOTTE *et al.*, 2014). Ademais, a disponibilidade inicial de zinco está bem acima do nível crítico encontrado por Couto *et al.* (1992) usando extrator Mehlich⁻¹, em solos com diferentes valores do fator capacidade ($0,8$ a $4,6 \text{ mg dm}^{-3}$) para cultura de milho.

Tabela 6 – Resumo da análise de variância para fitomassa fresca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco ao solo. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios			
		FFP	FFG	FFS	FFE
Trat.	4	59,10 ^{ns}	102,10 ^{ns}	29,16 ^{ns}	174,00 ^{ns}
Bloco	3	384,97	796,02	107,64	1032,72
Erro	12	155,16	424,19	24,13	599,43
Média	-	171,56	184,55	105,95	462,06
CV (%)	-	7,26	11,16	4,64	5,30

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; FFP – Fitomassa fresca de palha da espiga; FFG – Fitomassa fresca do grão; FFS – Fitomassa fresca de sabugo; FFE – Fitomassa fresca da espiga.

Tabela 7 – Valores médios de fitomassa fresca dos componentes e total da espiga de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

Tratamentos	Fitomassa fresca, g planta ⁻¹			
	Palha	Grão	Sabugo	Espiga
0,0	174,83	188,74	109,00	472,58
2,5	173,50	176,99	105,83	456,33
5,0	165,41	189,50	107,16	462,08
7,5	170,25	184,66	101,66	456,58
10,0	173,83	182,83	106,08	462,75

Com relação aos componentes de fitomassa seca da planta de milho verde submetida às doses de zinco no solo, observou-se, assim como para fitomassa fresca, efeito não significativo na análise de variância dos dados, pelo teste F, ao nível de 5% de probabilidade (Tabela 8). Na

Tabela 9, abaixo, são observados os valores médios de fitomassa seca das partições, espiga e total da planta de milho verde. Pelo fato do teor de zinco presente no solo (Tabela 1) estar dentro dos teores considerados relativamente altos (SOUZA; LOBATO, 2004) para o suprimento da cultura, entende-se que o mesmo foi suficiente para atender à demanda da planta, o que justifica a ausência de resposta na aplicação de zinco na adubação de solo sob os componentes de fitomassa seca (GONÇALVES, 2017).

Andreotti *et al.* (2001), estudando a influência do zinco aplicado na adubação, em doses entre 1,4 e 20 kg ha⁻¹, sobre a produção de fitomassa seca de folhas de plantas de milho, observaram efeito não significativo sobre esta variável, corroborando com os resultados do presente trabalho. Todavia, Assmann (1993), que estudando o efeito da aplicação de doses zinco entre 0 e 54 kg ha⁻¹ no crescimento do milho e nos teores deste nutriente no solo e na planta, observou que os níveis crescentes de zinco promoveram efeito positivo sobre a produção de fitomassa seca. Muner *et al.* (2011) ao avaliarem a resposta de milho à adição de zinco no solo em doses que variaram entre 0 e 16 kg ha⁻¹, concluíram que, quando o solo foi fertilizado com este nutriente, observou-se maior produção de fitomassa seca da parte aérea das plantas de milho.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância para fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios						
		FSC	FSF	FSP	FSG	FSS	FSE	FST
Trat.	4	72,66 ^{ns}	13,81 ^{ns}	7,34 ^{ns}	90,35 ^{ns}	8,85 ^{ns}	95,07 ^{ns}	251,32 ^{ns}
Bloco	3	556,96	59,92	15,63	26,90	6,86	49,49	1166,28
Erro	12	281,12	26,33	10,65	96,38	4,53	175,38	858,18
Média	-	138,10	60,20	41,70	57,54	34,86	134,11	332,41
CV (%)	-	12,14	8,52	7,83	17,06	6,10	9,88	8,81

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; FSC – Fitomassa seca de caule; FSF – Fitomassa seca de folha; FSP – Fitomassa seca de palha da espiga; FSG – Fitomassa seca do grão; FSS – Fitomassa seca de sabugo; FSE – Fitomassa seca da espiga; FST – Fitomassa seca total.

Tabela 9 – Valores médios de fitomassa seca das partições, espiga e total da planta de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

Tratamentos	Fitomassa seca, g planta ⁻¹						
	Caule	Folha	Palha	Grão	Sabugo	Espiga	Total
0,0	143,03	62,14	42,50	54,60	35,37	132,47	337,65
2,5	137,31	59,24	41,55	52,28	33,04	126,88	323,45
5,0	141,82	61,34	39,43	64,71	35,85	140,00	343,17
7,5	135,37	57,46	42,15	59,10	33,57	134,83	327,67
10,0	132,96	60,79	42,85	57,00	36,48	136,35	330,10

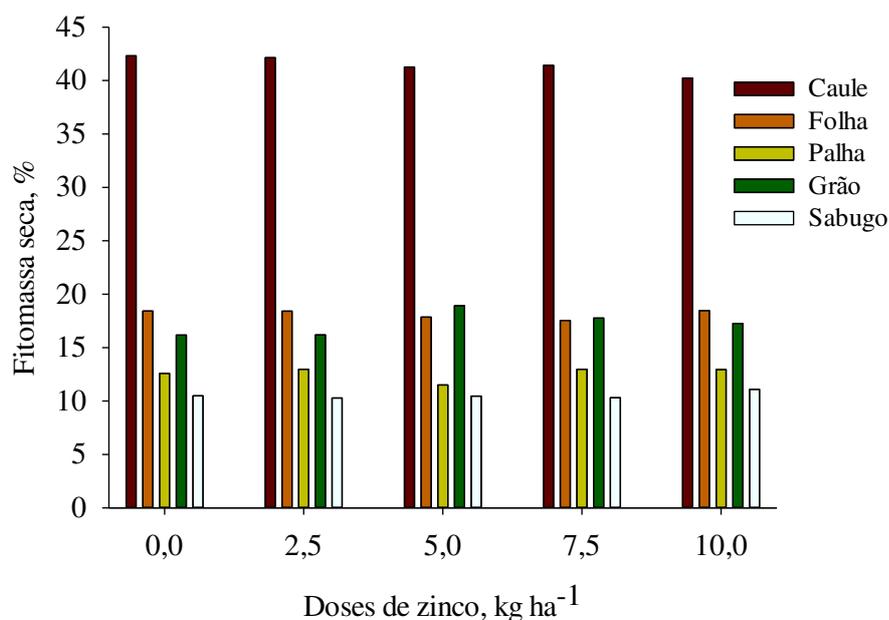
Na Tabela 10 são apresentados os resultados da análise de variâncias dos dados de produção relativa percentual de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde submetidas às doses de zinco no solo. Não foi observada diferença significativa, pelo teste F, para as características de produção relativa de fitomassa seca analisadas. De acordo com análise da composição percentual estrutural da planta (Figura 16), com base na fitomassa seca, verifica-se a seguinte ordem decrescente: caule > folha > grão > palha > sabugo.

Tabela 10 – Resumo da análise de variância para produção relativa de fitomassa seca nas diferentes partes da planta de milho verde sob doses de zinco. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios				
		PFSC	PFSF	PFSP	PFSG	PFSS
Trat.	4	2,73 ^{ns}	0,69 ^{ns}	1,61 ^{ns}	5,34 ^{ns}	0,43 ^{ns}
Bloco	3	11,74	3,16	3,06	0,22	0,88
Erro	12	6,80	1,12	0,77	4,92	0,45
Média	-	41,47	18,14	12,60	17,26	10,52
CV (%)	-	6,29	5,85	6,99	12,85	6,41

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; PFSC – Percentual de fitomassa seca de caule; PFSF – Percentual de fitomassa seca de folha; PFSP – Percentual de fitomassa seca de palha da espiga; PFSG – Percentual de fitomassa seca do grão; PFSS – Percentual de fitomassa seca de sabugo.

Figura 16 – Participação percentual de caule, folha, palha, grão e sabugo na composição da fitomassa seca total da planta de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Para as variáveis ‘teor’, ‘acúmulo de zinco na folha’, e ‘teor de zinco no solo’ foram obtidos resultados significativos, pelo teste F, na análise de variância (Tabela 11), tendo os

dados ajustando-se às equações lineares crescentes de maneira consistente. Já para as variáveis ‘teor’ e ‘acúmulo de zinco no grão’, não foi observada diferença significativa, de acordo com resultados da análise de variância (Tabela 11 e 12).

Tabela 11 – Resumo da análise de variância para os teores e acúmulos de zinco na folha e nos grãos da planta de milho verde e teor de zinco no solo da área ao final do experimento. Pombal – PB, 2019

FV	GL	Quadrados Médios				
		TZnF	AcZnF	TZnG	AcZnG	TZnS
Trat.	4	103,80**	0,33**	0,41 ^{ns}	0,065 ^{ns}	0,76**
Bloco	3	2,73	0,013	1,69	0,0046	0,011
Erro	12	3,69	0,030	6,74	0,097	0,021
Média	-	21,29	1,27	25,6	1,45	1,08
CV (%)	-	9,03	13,69	10,32	21,52	13,50

** - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 1%; * - Efeito significativo, pelo teste F, ao nível de significância de 5%; ^{ns} – Não significativo pelo teste F, ao nível de 5%; TZnF – Teor de zinco na folha; AcZnF – Acúmulo de zinco na folha; TZnG – Teor de zinco no grão; AcZnG – Acúmulo de zinco no grão; TZnS – Teor de zinco no solo.

O teor de zinco na folha apresentou ajuste linear crescente em função das doses de zinco usadas na biofortificação agrônômica do milho (Figura 17), tendo se observado incremento de 84,94% para a maior dose estudada em relação à Testemunha. Estes resultados corroboram com aqueles encontrados por Abreu (2012), ao estudar efeito de doses de zinco no solo sob as características nutricionais e morfofisiológicas do híbrido de milho AG 1051. Em doses a partir de 5,0 kg ha⁻¹ de zinco ao solo, observou-se teor foliar dentro da faixa de suficiência para a cultura do milho (20 – 70 mg kg⁻¹) (MALAVOLTA *et al.*, 1997; MARTINEZ *et al.*, 1999).

Com relação ao acúmulo de zinco na folha, assim como para o teor deste nutriente neste mesmo órgão, observou-se comportamento linear crescente em relação às doses aplicadas na adubação do solo (Figura 18). De maneira geral, as concentrações encontradas devem estar relacionadas à sua maior absorção quando aplicado em maior dosagem, sendo armazenado nas partes vegetativas e posteriormente translocado para os grãos (FERREIRA *et al.*, 2001). Na maior dose de zinco empregada, verificou-se, em detrimento da Testemunha, um acréscimo de 81,60% nesta varável.

Vale ressaltar que, a extração de zinco pelo milho ocorre até o final do ciclo, sendo que um terço ou mais da absorção total ocorre tardiamente, a partir do início do enchimento de grãos até a maturação (DUARTE *et al.*, 2003).

Figura 17 – Teor de zinco na folha de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019

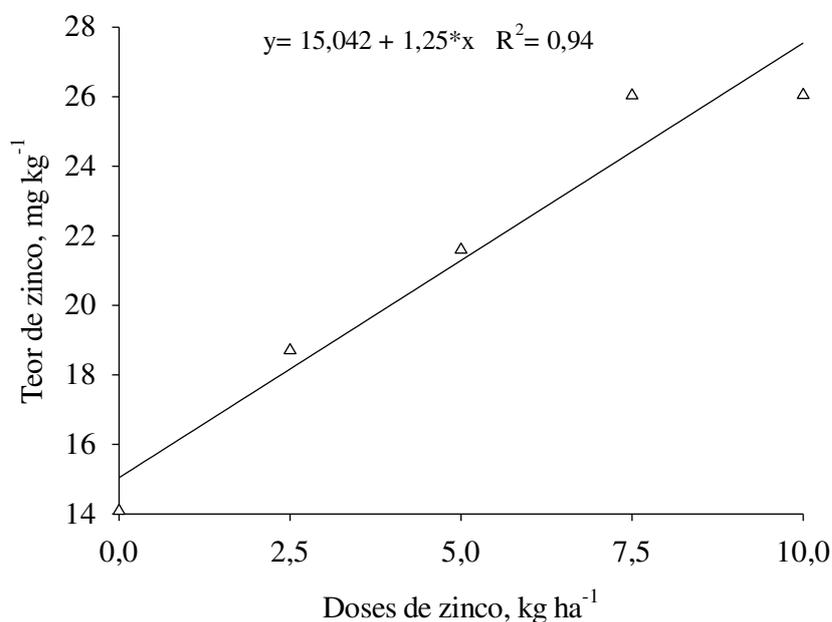
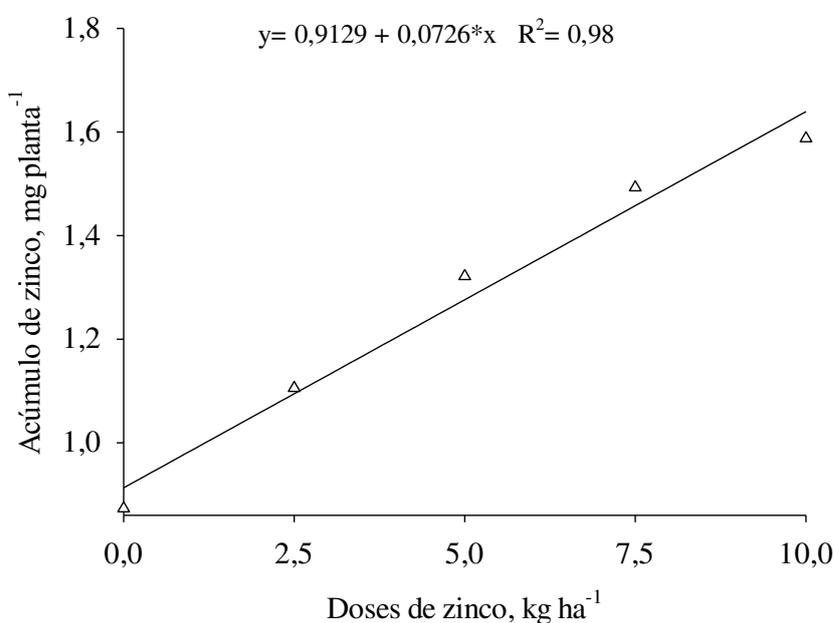


Figura 18 – Acúmulo de zinco na folha de milho verde de milho verde em resposta às doses de zinco aplicadas ao solo da área de cultivo. Pombal – PB, 2019



Na Tabela 12, são apresentados os resultados do teor e acúmulo de zinco nos grãos do milho verde de acordo com os tratamentos-doses utilizados. No presente trabalho, os teores médios de zinco nos grãos estão bem abaixo do nível-alvo de 40 mg kg⁻¹, estabelecido pelo Harvest Plus como meta para os programas de biofortificação da cultura do milho (SENA,

2010). O zinco acumulado nos grãos de milho verde pode ser proveniente da raiz, via xilema, ou de outros órgãos das plantas como folha, via floema, que dependerá da sua redistribuição. Este micronutriente é considerado pouco móvel na planta (MALAVOLTA, 2006). Para Marschner (1995), a maior ou menor translocação do zinco para os grãos de milho verde depende de sua disponibilidade na parte vegetativa, pois, quando em maiores concentrações, apresenta-se complexado a compostos orgânicos de baixo peso molecular.

Segundo Gonçalves (2017), existe um baixo coeficiente de correlação entre as concentrações de zinco nos tecidos foliares e suas respectivas concentrações nos grãos ($r = 0,28$; $\alpha = 0,05$), sugerindo que a translocação do nutriente armazenado nos tecidos vegetativos até 73 dias após emergência não é determinante para elevação dos seus teores nos grãos. Tais resultados convergem com o relatado por Cakmak *et al.* (2010a), onde pulverizações foliares, realizadas em pós-floração, promoveram maior impacto na concentração de zinco nos grãos. Ainda segundo Cakmak *et al.* (2010b), as aplicações de zinco no solo são menos eficazes que as aplicações foliares nos aumentos significativos da concentração deste nutriente nos grãos.

Tabela 121 – Valores médios de teor e acúmulo de zinco nos grãos de milho verde. Pombal – PB, 2019

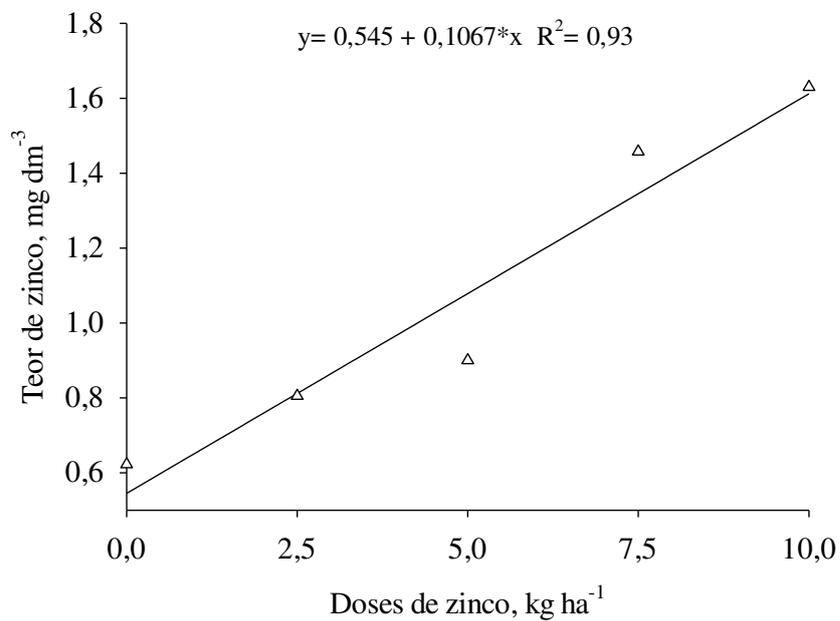
Tratamentos	Teor de Zn no grão, mg kg ⁻¹	Acúmulo de Zn no grão, mg planta ⁻¹
0,0	24,79	1,34
2,5	24,97	1,30
5,0	25,07	1,62
7,5	25,40	1,50
10,0	25,57	1,46

Com relação ao teor de zinco no solo cultivado, sob doses deste nutriente para a cultura do milho verde (Figura 19), observou-se resposta ajustada em equação linear crescente, com teor máximo de zinco de 1,63 mg dm⁻³, na maior dose estudada, o que corresponde ainda a um acréscimo de quase duas vezes no teor em relação à dose Testemunha. Contudo, o maior teor de zinco disponível no solo, observado na dose máxima de adubação, é 66,39% menor que o teor inicial verificado na área experimental, redução que indica, em parte, a remoção deste micronutriente pelas plantas de milho durante o crescimento vegetativo e reprodutivo. Moreira (2015) relata acumulação total de 5,57 mg de zinco planta⁻¹ de milho verde AG 1051, aos 71 dias após semeadura, sendo que do total, 23,65% (1,31 mg Zn planta⁻¹) são exportados da área cultivada pela colheita da espiga.

O zinco é considerado o micronutriente mais limitante à produtividade da cultura do milho. Diversos fatores interferem na disponibilidade deste nutriente para as plantas, dentre

eles, o pH, teores de argila, fósforo e carbono orgânico e óxidos de ferro, alumínio e manganês. Com o aumento do valor do pH, há diminuição da disponibilidade desse elemento para as plantas. Dessa forma, em solos alcalinos, com menor disponibilidade de zinco às plantas, a biofortificação agrônômica com este micronutriente, em doses adequadas, se mostra extremamente eficiente e indispensável para incrementos nos teores foliares e de grãos de milho destinados à alimentação humana (MALAVOLTA, 2006).

Figura 19 – Teor de zinco no solo em resposta às doses de zinco aplicadas à área de cultivo. Pombal – PB, 2019



5 CONCLUSÕES

A biofortificação agronômica apresentou efeito significativo positivo sobre o teor e acúmulo de ferro e zinco nas folhas de milho verde, híbrido AG 1051, com melhor desempenho observado em função da maior dose empregada.

A biofortificação agronômica do híbrido de milho verde AG 1051 com doses de ferro até 10 kg ha⁻¹ se mostrou ineficiente em aumentar o teor deste nutriente nos grãos.

A biofortificação agronômica do milho verde com zinco, em doses até 10 kg ha⁻¹, não apresentou resposta significativa no incremento dos teores deste micronutriente nos grãos.

REFERÊNCIAS

- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. *In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). Fertilidade do solo*. Viçosa: Editora da SBCS, 2007. p.646-736.
- ABREU, J. A. A. **Doses de zinco em genótipos de milho em gleissolo háplico no município de Iranduba-AM**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Mestrado em Agronomia Tropical, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2012.
- AGROSALUD. Disponível em: <http://www.agrosalud.org/>. Acesso em: 09 jan. 2019.
- ALBUQUERQUE, C. J. B. *et al.* Desempenho de híbridos experimentais e comerciais de milho para produção de milho verde. **Ciênc. Agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 3, p.768-775, maio 2008.
- ALVAREZ V, V. H. *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. *In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G. e ALVAREZ V, V. H. (eds.). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999, 359p.
- ALVES, L. V. F. V. **Estratégias de adubação com zinco para biofortificação agrônômica do feijão-caupi**. 2017. 71f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Agricultura Tropical, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2017.
- ANDREOTTI, M. *et al.* Componentes morfológicos e produção de matéria seca de milho em função da aplicação de calcário e zinco. **Sci. agric.**, Piracicaba, v.58, n. 2, p. 321-327, Jun. 2001.
- ASSMANN, A. L. **Efeito da aplicação de Fe, Mn e Zn no crescimento do milho e nos teores de Fe, Mn, Zn e Cu do solo e da planta**. 1993. 105f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1993.
- BÄNZIGER, M.; LONG, J. K. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant breeding. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 397- 400, Oct./Dec. 2000.
- BARBOSA, N. A. **Retenção de carotenoides em milho verde biofortificado com precursores de vitamina A após processamento**. 122f. 2013. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Lavras, 2013.
- BARBOSA, N. A. *et al.* Carotenoid retention in minimally processed biofortified green corn stored under retail marketing conditions. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.39, n. 4, p. 363-371, jul./ago. 2015.
- BATEMAN, H.; CURTIS, S.; MCADAM, K. **Dictionary of Agriculture**. 3 ed. A&C Black: London. 2006, 269 p.
- BELLOTTE, J. L. M. *et al.* Biofortificação agrônômica do milho utilizando elevadas doses de zinco e inoculação com *Azospirillum brasilense*. *In: FERTBIO*, 2014, Araxá. **Anais [...]**. Viçosa: SBCS, 2014. p. 338 - 338.

BITYUTSKII, N. P.; MAGNITSKIY, S. V.; KOROBAYNIKOVA, L. P.; LUKINA, E. I.; SOLOVIOVA, A. N.; PATSEVITCH, V. G.; LAPSHINA, I. N.; MATVEEVA, G. V. Distribution of iron, manganese, and zinc in mature grain and their mobilization during germination and early seedling development in maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.25, n.3, p.635-653, Mar. 2002.

VILAS BOAS, L. G. Fome oculta e seus liames com a economia, a política e a sociedade. **Revista Digital para Estudantes de Geografía y Ciencias Sociales**, Alicante, v. 7, n. 90, p. 207-232, set. 2016.

BORGES, I. D. **Marcha de absorção de nutrientes e acúmulo de matéria seca em cultivares de milho**. 2006. 115f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

BEHERA, S. K. *et al.* Distribution variability of total and extractable zinc in cultivated acid soils of India and their relationship with some selected soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v.162, n.3, p.242-250, May, 2011.

BOLIANI, E. **Adubação e biofortificação: caracterização química e física do arroz (*Oryza sativa* L.)**. 2012. 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Alimentos) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

BORÉM, A.; RIOS, S. A. **Milho biofortificado**. UFV: Viçosa, 2011. 211p.

BORÉM, A.; MIRANDA, G. **Melhoramento de Plantas**. 6. ed. UFV: Viçosa. 2013, 530p.

BRITO, L, T, L. *et al.* Produtividade da água de chuva em culturas de subsistência no Semiárido Pernambucano. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.1, p.102-109, Jan./Fev. 2012.

CAKMAK, I. *et al.* Biofortification and Localization of Zinc in Wheat Grain. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, [s.l.], v.58, n.16, p.9092-9102, 25 ago. 2010a.

CAKMAK, I. *et al.* Review: Biofortification of Durum Wheat with Zinc and Iron. **Cereal Chemistry Journal**, [s.l.], v.87, n.1, p.10-20, jan., 2010b.

CAKMAK, I. Enrichment of cereal grains with zinc: agronomic or genetic biofortification? **Plant and Soil**, v.302, p.1-17, 2008.

CAMPOS, M. C. C.; QUEIROZ, S. B. Reclassificação dos Perfis Descritos no Levantamento Exploratório-Reconhecimento de Solos do Estado da Paraíba. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, João Pessoa, v.6, n.1, p.45-50, janeiro, 2006.

CARVALHO, J. L. V.; NUTTI, M. R. Biofortificação de produtos agrícolas para nutrição humana. *In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC*, 64., 2012, São Luís. **Anais [...]** São Luís: SBPC: UFMA, 2012.

CAVALCANTI F. J. A. *et al.* **Recomendação de adubação para o estado de Pernambuco: 2ª aproximação**. Recife: IPA, 2008. 94 p.

CORBO, J. Z. F. **BIOFORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO E DO MILHO COM SELÊNIO**. 2014. 65f. Dissertação (Mestrado em Agricultura Tropical) – IAC, Campinas, 2014.

COUTO, C. *et al.* Níveis críticos de zinco no solo e na planta para o crescimento de milho em amostras de solos com diferentes valores do fator capacidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.16, p.79-87, 1992.

COUTO JUNIOR P. A. *et al.* Aplicação de diferentes doses e adubação de micronutrientes via solo na cultura do feijoeiro. **Bioscience. Journal**, Uberlândia, v.29, n.1, p.8-14, jan./fev. 2013.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**. Diagnostico do Município de Vieirópolis, estado da Paraíba. Recife, CPRM/PRODEEM, 2005.

DUARTE A. P. *et al.* Acúmulo de matéria seca e nutrientes em cultivares de milho originais de clima tropical e introduzidos em clima temperado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.2, n.3, p.1-20, jun., 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Embrapa: Rio de Janeiro. 1997, 212 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. 2ª ed. Londrina-PR, 2006, 335p.

FABRÍCIO, V. L. *et al.* Benefícios sanitários do sabugo de milho enriquecido ou não para roedores e técnicos de laboratório. **Resbcal**, São Paulo, v.1, n. 2, p.169-174, jun. 2012.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. **State of Food and agriculture 2013: investing in agriculture for a better future**. FAO: Rome, 2013. 114p.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Faostat 2014**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 24 jan. 2017.

FAQUIN, V. **Nutrição Mineral de Plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE. 2005.

FARAGO, M. E. (Ed.) **Plants and the Chemical Elements: Biochemistry, Uptake, Tolerance and Toxicity**. New York: VCH, 1994. 298p.

FERREIRA, A. C. B. *et al.* Características agronômicas e nutricionais do milho adubado com nitrogênio, molibdênio e zinco. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n. 1, p. 131-138, Mar., 2001.

FERREIRA, D. F. Análises estatísticas por meio do Sisvar para Windows versão 4.0. *In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA*, 45, 2000, São Carlos. **Anais...** São Carlos: UFSCAR, 2000. p.255-258.

FREIRE, F. M. *et al.* Milho verde. *In: RIBEIRO, A.C.; GUIMARAES, P.T.G.; ALVAREZ V., V.H. (Ed.). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais:*

5ª. aproximação. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

FURTINI NETO, A. E. *et al.* **Fertilidade do solo**. Lavras: ULFA/FAEPE. 2001, 261p.

GONÇALVES, A. S. F. **Avaliação de híbridos de milho visando à biofortificação com zinco**. 2017. 57f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Agronomia/Fitotecnia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2017.

GONÇALVES, A. S. F. *et al.* Uso da biofortificação vegetal: uma revisão. **Cerrado Agrociências**, Patos de Minas, n.6, p.75-87, dez., 2015.

GLIMN-LACY, J.; KAUFMAN, P. B. **Botany Illustrated: Introduction to Plants, Major Groups, Flowering Plant Families**. 2. ed. Springer: New York. 2006, 146p.

GOTT, R. M. **Índices diagnósticos foliares para a cultura do milho no alto Parnaíba – MG**. 2013. 72f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Viçosa, Rio Parnaíba, 2013.

GRACIANO, P. D. **Biofortificação agrônômica com zinco em cultivares de alface crespa**. 2019. 36f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GREBMER, K. V. *et al.* **Global Hunger Index: The Challenge of Hidden Hunger**. International Food Policy Research Institute: Washington, D.C., 2014. 51p.

GUGALA, M.; ZARZECKA, K. Effect of weed control operations and tillage simplifications on iron content and uptake with potato tuber yield. **Journal Elementology**, v.13, p.321-327, 2008.

GUIMARÃES, P. D. O. *et al.* **Caracterização de linhagens de milho quanto aos teores de minerais nos grãos**. Embrapa Milho e Sorgo: Sete lagoas, 2005. 4p. (Circular Técnica 64).

HAN, X. *et al.* Zinc fractions and availability to soybeans in represent soils of Northeast China. **Journal of Soils and Sediments**, Brisbane, v.11, n.1, p.596-606, Oct., 2011.

HARGREAVES, G.H. Estimation of potential and crop evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, v.17, n.1, p.701-704, 1974.

HARVESTPLUS. Disponível em: [http:// www.harvestplus.org](http://www.harvestplus.org). Acesso em: 03 jan. 2019.

INOCENCIO, M. F. **Frações de zinco no solo e biofortificação agrônômica com selênio, ferro e zinco em soja e trigo**. 2014. 88 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

IOM - Institute of Medicine, Food and Nutrition Board. **Dietary reference intakes: applications in dietary assessment**. Washington (DC): National Academy Press; 2000.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4 ed. New York: CRC Press, 2011. 548p.

KUTMAN, U. B. *et al.* Biofortification of durum wheat with through soil and foliar applications of Nitrogen. **Cereal Chemistry**, Saint Paul, v. 87, n. 1, p 1- 9, Fev. 2011.

LONG, J. K.; BANZIGER, M.; SMITH, M. E. Diallel analysis of grain iron and zinc density in southern african-adapted maize inbreds. **Crop Science**, Madison, vol. 44, n. 6, p. 2019-2026, Nov. 2004.

MAGALHAES, A. G. *et al.* Desenvolvimento inicial do milho submetido à adubação com manureira. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 18, n. 7, p. 675-681, Jul. 2014 .

MAIA, C. E. *et al.* Teores foliares de nutrientes em meloeiro irrigado com água de diferentes salinidades. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p.292-295, dez. 2005.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Editora Agronômica Ceres Ltda., 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira da Potassa e do Fosfato, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plant**. 2 ed. New York: Academic Press, 1995. 889p.

MARTINEZ E. E. P. *et al.* **Diagnose foliar**. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G. e ALVAREZ V, V. H. (eds.). Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª aproximação. Viçosa: CFSEMG, 1999, 359p.

MARTINS, C. M. *et al.* Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, vol.34, n.6, p.1883-1890, 2010.

MAPA (Brasil). **Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários do MAPA**. 2017. Disponível em: http://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons. Acesso em: 27 jun. 2017.

MAZIYA-DIXON, B.; KLING, J. G.; MENKIR, A.; DIXON, A. Genetic variation in total carotene, iron, and zinc contents of maize and cassava genotypes. **Food and Nutrition Bulletin**, Tokyo, v. 21, n. 4, p. 419-422, Oct./Dec. 2000.

MENKIR, A. Genetic variation for grain mineral content in tropical-adapted maize inbred lines. **Food chemistry**, London, v.110, n.2, p.454-464, Sept., 2008.

MORAES, M. F. *et al.* Práticas agronômicas para aumentar o fornecimento de nutrientes e vitaminas nos produtos agrícolas alimentares. In: LANA, R. P.; MÂNCIO, A. B.; GUIMARÃES, G.; SOUZA, M. R. M. (Eds.). **I Simpósio Brasileiro de Agropecuária Sustentável**. Viçosa: Departamento de Zootecnia – UFV, 2009. p.299-312.

MOREIRA, J. C. **Acúmulo de matéria seca e nutrientes na cultura do milho verde**. 2015. 56f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2015.

MUNER, L. H. *et al.* Disponibilidade de zinco para o milho em resposta à localização de fósforo no solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.15, n.1, p.29-36, jan., 2011.

NEUMANN, M. *et al.* Rendimentos e componentes de produção da planta de milho (*Zea mays* L.) para silagem, em função de níveis de adubação nitrogenada em cobertura. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.4, n.3, p.418-427, dez., 2005.

NUTTI, M. R.; CARVALHO, J. L. V. de; RODRIGUES, P. S. M. O progresso das ações de biofortificação no Brasil. **Boletim Informativo da SBCS**, Viçosa, v.2, n.42, p.24-27, mai./ago., 2016.

OIKEH, S. O.; MENKIR, A.; MAZIYA-DIXON, B.; WELCH, R.; GLAHN, R. P. Genotypic differences in concentration and bioavailability of kernel-iron in tropical maize varieties grown under field conditions. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.26, n.11, p. 2307-2319, Oct., 2003a.

OIKEH, S. O.; MENKIR, A.; MAZIYA-DIXON, B.; WELCH, R.; GLAHN, R. P. Assessment of concentrations of iron and zinc and bioavailable iron in grains of early-maturing tropical maize varieties. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Easton, v.51, n.13, p.3688-3694, Jun., 2003b.

OLIVEIRA, M. A. *et al.* Desempenho agrônômico do milho de segunda safra sob adubação mineral e inoculação das sementes com rizobactérias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.10, p.1040-1046, jul. 2012.

PEREIRA FILHO, I. A. **O cultivo do milho verde**. Embrapa: Sete Lagoas. 2002, 217p.

QUEIROZ, V. A. V. *et al.* Iron and zinc availability in maize lines. Iron and zinc availability in maize lines. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, Campinas, v.31, n.03. pp. 577-583, 2011.

RENGEL, Z.; BATTEN, G. D.; CROWLEY, D. E. Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. **Field Crops Research**, v.60, p.27-40, 1999.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COLEHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2013. 353p.

SENA, M. R. **Estabilidade de variedades de milho quanto aos teores de minerais nos grãos**. 2010. 74f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Melhoramento de Plantas, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

- SILVA, M. A. G.; MUNIZ, A. S.; COSTA, A. C. S.; CEGANA, A. C. V. Extratores para a quantificação de Fe em solos cultivados com soja. **Acta Science. Agronômica**, 26:367-371, 2004.
- SILVA, S. S. *et al.* Extração e caracterização de xilanas de sabugos de milho. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v.8, n. 2, p.25-33, abr. 1998.
- SILVA, V. P. R. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.547-553, 2005.
- SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. 416p.
- SOUSA, G. G. *et al.* Acumulação de biomassa, teores e extração de micronutrientes em plantas de milho irrigadas com águas salinas. **Agropecuária Técnica**, Areia, v.31, n. 2, p.1-10, dez. 2010.
- SOUZA, L. H. *et al.* Efeito do pH do solo rizosférico e não rizosférico de plantas de soja inoculadas com *Bradyrhizobium japonicum* na absorção de boro, cobre, ferro, manganês e zinco. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v.34, n. 5, p. 1641-1652, Out., 2010.
- STEINER, F. *et al.* Zinco e nitrogênio no desempenho agrônômico do milho safrinha. **Gl. Sci. Technol.**, v.4, n. 2, p. 09-17, mai/ago. 2011.
- SYSTAT SOFTWARE INC. **Table Curve 3D**. Versão 4.0. Londres, 2002.
- TAVARES, L. C. *et al.* Physiological performance of wheat seeds coated with micronutrients. **Journal of Seed Science**, v.35, n.1, p.28-34, 2013.
- TSUNECHIRO, A.; MIURA, M. Caracterização Técnico-Econômica da Cultura do Milho Verde no Brasil em 2006. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29, 2012, Águas de Lindóia. **Anais [...]** Águas de Lindóia: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, p.3433-3439, 2012.
- VALLADARES, G. S. *et al.* Zinco total e disponível em amostras de perfis de solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.68, n.4, p.1105-1114, out., 2009.
- VARGAS, L.; PEIXOTO, C. M.; ROMAN, E. S. **Manejo de plantas daninhas na cultura do milho**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 67p.
- VELLOZO, E. P.; FISBERG, M. O impacto da fortificação de alimentos na prevenção da deficiência de ferro. **Revista Brasileira Hematologia Hemoterapia**, São Paulo, v.32, supl.2, p.134-139, Jun., 2010.
- VON PINHO, R. G. *et al.* MARCHA DE ABSORÇÃO DE MACRONUTRIENTES E ACÚMULO DE MATÉRIA SECA EM MILHO. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.8, n.2, p.157-173, ago. 2009.
- WIEDENHOEFT, A. C. **Plant Nutrition**. New York: Chelsea House, 2006. 153p.