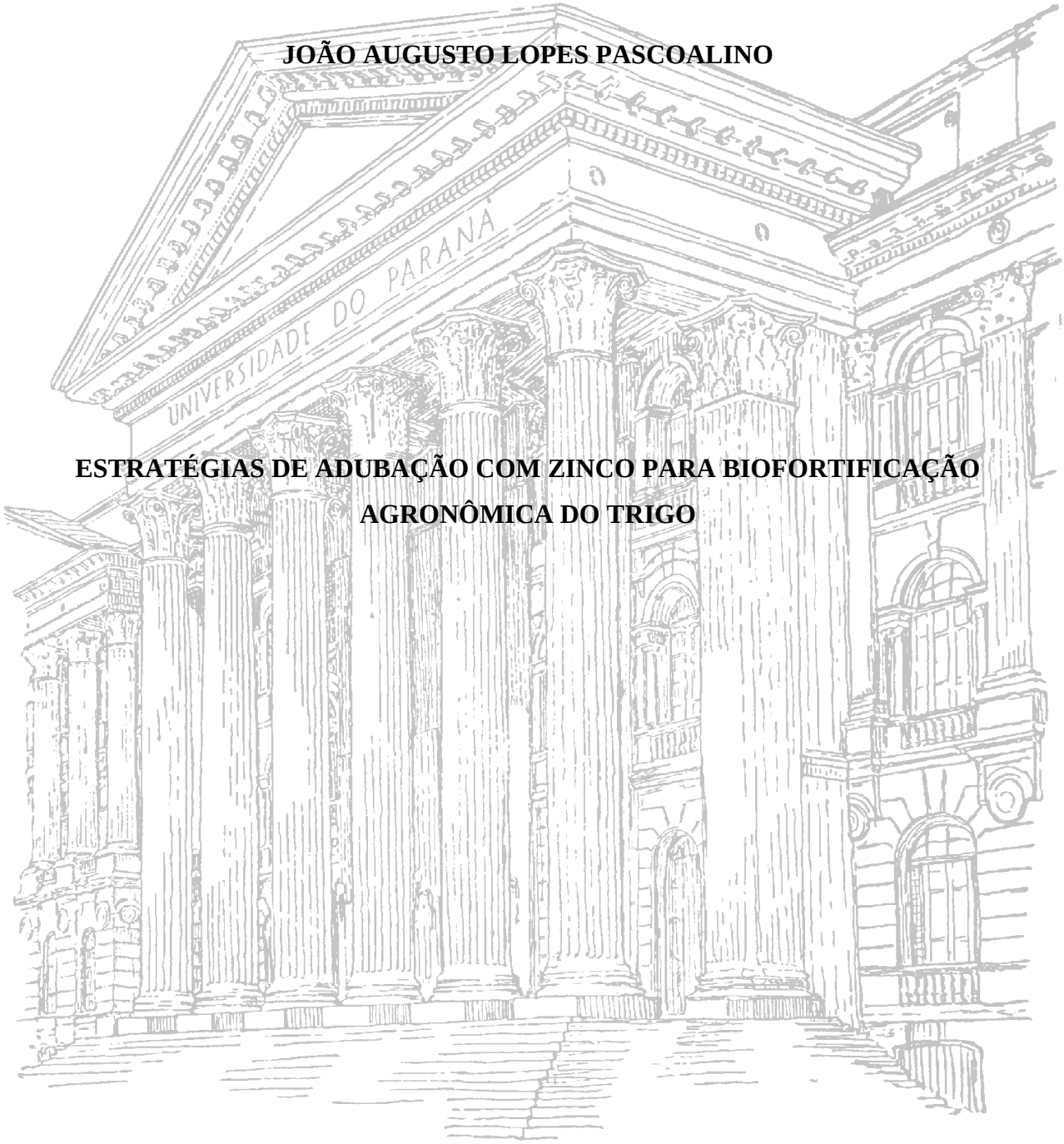
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO AUGUSTO LOPES PASCOALINO



ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO COM ZINCO PARA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO TRIGO

CURITIBA

2014

JOÃO AUGUSTO LOPES PASCOALINO

ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO COM ZINCO PARA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO TRIGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes
Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos V. Motta
Co-orientador: Prof. Dr. Leandro Paiola Albrecht
Co-orientador: Dr. Francisco de Assis Franco

CURITIBA

2014

P A R E C E R

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de **JOÃO AUGUSTO LOPES PASCOALINO, intitulada**: **Estratégias de adubação com zinco para biofortificação agronômica do trigo,** do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela **"APROVAÇÃO"** da referida Dissertação. O candidato atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente.**

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 20 de fevereiro de 2014.

Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes, Presidente

Dr. Francisco de Assis Franco, Iº. Examinador

Prof. Dr. Antonio Carlos Vargas Motta, IIº. Examinador

Aos meus pais, João Batista Pascoalino e Helena Aparecida Lopes Pascoalino,
pelo constante apoio, companheirismo e amor incondicional.
Sem vocês eu nada seria!

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Pode ser por um simples favor ou por uma grande atitude, mas o agradecimento nunca deve ser esquecido...

A Deus
O responsável pela nossa existência, a quem humildemente eu agradeço a cada momento da minha vida, pois é ao seu lado que caminho em prol de alcançar meus objetivos e ajudar ao próximo. Neste momento agradeço por mais esta conquista, na qual almejava tanto, sendo um grande sonho meu e da minha família.
Continue guiando meus passos.

A minha família
Que é meu porto seguro! Meus pais: João Batista Pascoalino e Helena Aparecida Lopes Pascoalino. Pessoas que tenho grande sentimento de amor, admiração pela forma com que conquista seus objetivos, sempre com coragem, garra, honestidade e simplicidade. Conquistas essas, dedicadas direta e indiretamente para criação e educação minha e de meus irmãos Fernando Augusto Lopes Pascoalino e Renan Augusto Lopes Pascoalino, que também são pessoas maravilhosas e que se espelham em nossos pais igualmente a mim para obter nosso próprio sucesso tanto pessoal, quanto profissional.

A família da minha noiva
Sergio Vicente Guerra, Solange Aparecida de Lima Guerra, Sergio de Lima Guerra, Sebastião de Lima e Candida Polizeli de Lima. O apoio, a ajuda, o carinho que proporcionaram e proporcionam é de grande importância para minha vida. Obrigado pela atenção e pelo carinho dedicado a mim. E quero que saibam que tudo o que fazemos pensando em ajudar ao próximo, nos é devolvido em dobro.

A minha noiva
Talita Cristiane de Lima Guerra, uma pessoa que merece ser homenageada de todas as formas, pois é nesta pessoa que encontro apoio para todas as ocasiões e dificuldades da minha vida. É ela que se preocupa em me fazer feliz, com gestos de atenção, carinho que proporciona momentos de paz e de muita alegria em minha vida. Você faz a diferença e por isso quero agradecer, Muito Obrigado.
Você é mesmo uma pessoa muito especial!

Aos amigos
Que acompanharam minha jornada, compartilhando e auxiliando durante todo o período do mestrado, em inúmeros momentos, sendo de felicidades e dificuldades. Saibam que vocês se tornaram pessoas importantes para mim, e que pretendo cultivar nossa amizade por muito tempo. Dentre eles, destaco: Adilson de Oliveira Junior, Bruna Wurr Rodak, Joviano Jacson Kleinert, Mariana Giovanini Turcatto, Marcus Vinícius Bertoncelo e Steve Jasson Fernandes Alves. Por não pouparem esforços e sempre quando eu necessitei estarem aptos a ajudarem.

Aos professores e funcionários
Do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná. Aos professores que tem amor em dar aulas, em ensinar o próximo, em trabalhar pelo aprendizado dos mestrandos. Que são responsáveis em passar informações e conhecimentos fundamentais

para formação de futuros pesquisadores. Funcionários, que permitem e auxiliam no andamento dos trabalhos.

Ao orientador
Milton Ferreira de Moraes, preliminarmente por depositar confiança e acreditar em meu potencial na realização desse trabalho, e também por estar desde o início apoiando e orientando de forma sensata e construtiva. Além, de proporcionar oportunidades únicas de experiência profissional na área de atuação, somando para um completo crescimento pessoal e profissional.

Aos co-orientadores
Antônio Carlos Vargas Motta, Leandro Paiola Albrecht e Francisco de Assis Franco, que atuaram de forma positiva e complementar na elaboração desse trabalho. Quando necessitados, sempre atenciosos e dispostos á ajudarem.

A todos mencionados ou que por algum lapso não lembrei, presto meus sinceros agradecimentos pela simplicidade e generosidade em ajudar ao próximo. No mais, não encontro palavras que consigam expressar todo sentimento de gratidão, além do....

Muito obrigado!

Lute com determinação, abrace a vida com paixão, perca com classe e vença com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito bela para ser insignificante.

Charles Darwin

SUMÁRIO

RESUMO ..... **IX**
ABSTRACT ..... **X**
LISTA DE FIGURAS ..... **XI**
LISTA DE TABELAS ..... **XII**
1. INTRODUÇÃO **13**
2. MATERIAL E MÉTODOS **18**
2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL **18**
2.1.1 PALOTINA 18
2.1.2 CASCAVEL 18
2.2 INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS **20**
2.3 TRATAMENTO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL **20**
2.4 TRATOS CULTURAIS **21**
2.5 VARIÁVEIS RESPOSTAS **22**
2.5.1 PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA (BIOMASSA) 22
2.5.2 PRODUTIVIDADE E MASSA DE 1000 GRÃOS 22
2.5.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DO GRÃO 22
2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA **23**
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO **24**
3.1 PALOTINA **24**
3.1.1 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA 24
3.1.2 COMPONENTES AGRONÔMICO DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE 26
3.1.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DOS GRÃOS 29
3.1.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS RESULTADOS 32
3.2 CASCAVEL **35**
3.2.1 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA 35
3.2.2 COMPONENTES AGRONÔMICOS DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE 38
3.2.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DOS GRÃOS 40
3.2.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS RESULTADOS 43
3.3 COMPARAÇÕES ENTRE AMBIENTES DE PRODUÇÃO **45**
3.4 RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO DA APLICAÇÃO DE ZN **50**
4. CONCLUSÕES **53**
5. AGRADECIMENTO AOS APOIADORES **54**
6. LITERATURA CITADA **55**
7. RESUMO BIOGRÁFICO **64**

ESTRATÉGIAS DE ADUBAÇÃO COM ZINCO PARA BIOFORTIFICAÇÃO AGRONÔMICA DO TRIGO[(1)]

Autor: João Augusto Lopes Pascoalino
Orientador: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes
Co-orientador: Prof. Dr. Antônio Carlos V. Motta
Co-orientador: Prof. Dr. Leandro Paiola Albrecht
Co-orientador: Dr. Francisco de Assis Franco

RESUMO

Em razão de ser componente básico da dieta da população, o trigo apresenta grande potencial para biofortificação - que visa obter cultivares com grãos mais nutritivos, através de programas de melhoramento genético convencional e/ou práticas agronômicas. O enriquecimento de grãos de cereais em micronutrientes por meio da biofortificação ajudará a reduzir os crescentes problemas nutricionais na população. A aplicação de fertilizantes com zinco (Zn) tem apresentado resultados promissores quanto ao aumento da sua concentração em grãos de trigo, principalmente em solos que apresentam baixos teores disponíveis. Entretanto, há poucos estudos realizados em solos brasileiros de fertilidade construída, com teores de Zn adequados ou elevados. Desta forma, o objetivo do trabalho foi avaliar formas de aplicação de Zn em trigo, visando à melhoria da qualidade nutricional dos grãos e sua influência em componentes agronômicos da cultura. Foram realizados quatro experimento a campo, nos anos de 2012 e 2013, em Palotina e Cascavel, Paraná, Brasil. Ambos ambientes apresentavam a mesma classe de solo: LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, textura muito argilosa, todavia, com características edáficas e climáticas contrastantes. Cada experimento foi constituído de quatro tratamentos: (i) sem aplicação de Zn (controle); (ii) aplicação de Zn no solo (Zn-S); (iii) aplicação de Zn na folha (Zn-F) e (iv) aplicação de Zn no solo e na folha (Zn-S+F). O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com 4 repetições. A aplicação de Zn no solo foi realizado no plantio, com fornecimento de 250 kg ha^{-1} do formulado 8-30-20, que apresentava 4% de Zn (10 kg ha^{-1} de Zn). Para aplicação de Zn foliar, foi utilizada uma solução com 2% de sulfato de zinco ($ZnSO_4.5H_2O$), em taxa de aplicação de 200 L ha^{-1} (equivalente a 910 g ha^{-1} de Zn) e realizada no início do enchimento dos grãos. Foram cultivados dois genótipos de trigo: CD 150 e BRS Guamirim, sendo o primeiro escolhido por ser o cultivar comercial mais plantado no Paraná e o segundo por apresentar potencial para biofortificação (maiores teores de Zn nos grãos). Aplicação de Zn no solo aumentou a concentração de Zn nas folhas diagnóstico e nos grãos. A produtividade apresentou correlação negativa com a concentração de Zn nos grãos, sendo mais influenciada pelas características dos ambientes de produção. A aplicação de Zn no solo conciliado com a aplicação foliar (Zn-S+F) foi o método mais efetivo para aumentar o teor de Zn nos grãos. O cultivar BRS Guamirim apresentou maior número de afilhos, concentração de Zn, Fe e proteínas nos grãos, porém menor produtividade. A concentração de Zn apresentou correlação negativa com a produtividade e correlação positiva com número de afilhos, concentrações de Fe e proteína nos grãos. A seleção de um cultivar com potencial para biofortificação e que apresenta bom potencial produtivo, quando associada estratégias de aplicação de Zn, se mostrou a melhor opção para biofortificação agronômica do trigo.

Palavras chave: Saúde humana, desnutrição, qualidade de alimentos, micronutrientes, *Triticum aestivum.*

[(1)]Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (64p.) Fevereiro, 2014.

STRATEGIES TO APPLY ZINC FERTILIZERS ON THE AGRONOMIC BIOFORTIFICATION OF WHEAT[(1)]

Author: João Augusto Lopes Pascoalino
Advisor: Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes
Co-Advisor: Prof. Dr. Antônio Carlos V. Motta
Co-Advisor: Prof. Dr. Leandro Paiola Albrecht
Co-Advisor: Dr. Francisco de Assis Franco

ABSTRACT

Wheat is a basic component of the diet of the population and has great potential for biofortification - that seeks cultivars with more nutritious grains, through conventional plant breeding program and/or agronomic practices. Enrichment of cereal grains in micronutrients through biofortification will help to reduce the growing nutritional problems in the population. Zinc (Zn) fertilizer applications have shown promising results regarding the increase of its concentration in wheat grains, especially in soils with low levels of Zn available. However, there is few studies in Brazilian soils, in which have good fertility and adequate or high levels of Zn available. Thus, the objective of this study was to evaluate Zn application forms for wheat, aiming to improve the nutritional quality of the grains and their influence on agronomic components of wheat. Four field experiments were performed in the years 2012 and 2013, in Palotina and Cascavel, Parana state, Brazil. Both places had the same soil class: Red Oxisol clayey, with contrasting soil and climatic characteristics. Each experiment was composed of four treatments: (i) without Zn application (control treatment); (ii) Zn soil application (Zn-S); (iii) Zn foliar application (Zn-F); (iv) Zn soil and leaf application (Zn-S + F). The experimental design was a randomized block, with 4 replications. Zn soil application was made at planting, with supply of 250 kg ha^{-1} of a formulated 8-30-20, which had 4% of Zn (10 kg ha^{-1} Zn). For Zn foliar application was used a solution containing 2% zinc sulfate ($ZnSO_4.5H_2O$), with application rate of 200 L ha^{-1} (equivalent to 910 g ha^{-1} Zn) and performed at the beginning of the filling the grains. Two wheat cultivars were grown: CD 150 and BRS Guamirim. The first was chosen because is the most planted commercial cultivar in Paraná and the second by presenting potential for biofortification (higher levels of Zn in the grain). Zn soil application increased the concentration of Zn in diagnostic leaves and grains. Grain yield showed negative correlation with concentration of Zn in grains, being more influenced by the characteristics of environment production. The application of Zn in soil plus foliar application (Zn-S + F) was the most effective method to increase Zn concentration in grains. BRS Guamirim cultivar showed higher number of tiller, concentration of Zn, Fe and protein in grains, but lower yield. Grain Zn concentration showed negative correlation with yield and positive correlation with number of tillers, concentrations of Fe and protein in the grains. In conclusion, the selection of a cultivar with potential for biofortification and also that has good yield potential, when associated with strategies of Zn supply, proved to be the best option for agronomic biofortification of wheat.

Key words: Human health, malnutrition, food quality, micronutrients, *Triticum aestivum.*

[(1)]Soil Science Master Dissertation Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (64p.) February, 2014.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização dos ambientes: Palotina e Cascavel, estado do Paraná....18

Figura 2 - Dados climatológicos referente ao período de condução dos experimentos em Palotina-PR (a) e Cascavel-PR (b).....19

Figura 3 - Análise de componentes principais dos cultivares de trigo CD 150 (CD) e BRS Guamirim (BRS), Palotina, ano 2012 (a) e 2013 (b), em função dos métodos de aplicação: Controle (Sem aplicação) Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar).....33

Figura 4 - Análise de componentes principais dos cultivares de trigo CD 150 (CD) e BRS Guamirim (BRS), Cascavel, ano 2012 (a) e 2013 (b), em função dos métodos de aplicação: Controle (Sem aplicação) Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar).....44

Figura 5 - Influência do ambiente (Palotina e Cascavel) e da forma de aplicação de Zn nas suas concentrações nos grãos e na produtividade de cultivares de trigo. Ano 2012 (a) e 2013 (b). Test: Testemunha; Zn-S: Zn aplicado no solo; Zn-F: Zn aplicado via foliar e Zn-S+F: Zn aplicado no solo e via foliar.....46

Figura 6 - Comparação entre concentrações de Zn obtidas variando-se as formas de aplicação do elemento, com teores alvo de Zn para a cultura do trigo proposto pelo Programa HarvestPlus de Biofortificação, em Palotina 2012 (a) e 2013 (b) e Cascavel 2012 (c) e 2013 (b).....48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química e física do solo de Palotina e Cascavel, ano 2012/1013 e 2013/2014, realizadas antes do cultivo do trigo.....21

Tabela 2 - Teores foliares médios de macro e micronutrientes nos cultivares de trigo CD 150 e BRS Guamirim sob influência da aplicação de zinco no solo. Palotina, ano 2012 e 2013 (cada ano é um experimento).....25

Tabela 3 - Influência dos métodos de aplicação de zinco no afilhamento, biomassa, produtividade e massa de 1000 grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Palotina, ano 2012 e 2013.....28

Tabela 4 - Influência dos métodos de aplicação de zinco na concentração de Zn, Fe e proteína nos grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Palotina, ano 2012 e 2013.....31

Tabela 5 - Correlação de Pearson entre produtividade, afilhamento, concentração de Zn, Fe e proteína em trigo, cultivado em Palotina, ano 2012 e 2013.....35

Tabela 6 - Teores foliares médios de macro e micronutrientes nos cultivares de trigo CD 150 e BRS Guamirim sob influência da aplicação de zinco no solo. Cascavel, ano 2012 e 2013 (cada ano é um experimento).....37

Tabela 7 - Influência dos métodos de aplicação de zinco no afilhamento, biomassa, produtividade e massa de 1000 grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Cascavel, ano 2012 e 2013.....39

Tabela 8 - Influência dos métodos de aplicação de zinco na concentração de Zn, Fe e proteína nos grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Cascavel, ano 2012 e 2013.....42

Tabela 9 - Correlação de Pearson entre produtividade, afilhamento, concentração de Zn, Fe e proteína em trigo, cultivado em Cascavel, ano 2012 e 2013.....45

Tabela 10 - Somatório das médias de todos os tratamentos com aplicação do Zn, em relação à produtividade, concentração e acúmulo de Zn nos grãos, em distintos ambientes. Ano 2012.....50

Tabela 11 - Somatório das médias de todos os tratamentos com aplicação do Zn, em relação à produtividade, concentração e acúmulo de Zn nos grãos, em distintos ambientes. Ano 2013.....50

Tabela 12 Relação custo/benefício das formas de aplicação de Zn, considerando o excedente produzido em Palotina e Cascavel, em dois anos consecutivos de cultivo.....52

1. INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum L.*) está entre os cereais mais produzidos e consumidos no mundo, sendo cultivado em 217 milhões de hectare (ha) e com produção de aproximadamente 654 milhões de toneladas (FAO, 2012). Quando trata-se de segurança alimentar e nutricional ao nível mundial, o trigo apresenta importante papel, pois em muitas regiões é a principal fonte de carboidratos, proteínas, minerais e vitaminas do complexo B (Chavan & Kadam, 1989; Koehler et al., 2007).

Visto a importância desse produto agrícola como fonte primária de nutrientes, percebe-se que com o aumento da população, maiores quantidades desse alimento serão requeridas. Segundo Godfray et al. (2010), a população mundial continuará crescendo em ritmo acelerado até 2050, quando atingirá um platô em aproximadamente 9 bilhões de pessoas. Desta forma, a demanda global por alimentos também continuará a crescer e conforme tem sido estimado, no período de 1990-2030 haverá necessidade de duplicar a produção agrícola mundial, com aumento de duas vezes e meia a três nos países em desenvolvimento (Graham et al., 2001).

Embora a produção de alimentos tenha acompanhado o crescimento populacional, problemas de deficiência nutricional atingiram quase metade da população mundial, especialmente mulheres grávidas, adolescentes e crianças (Welch et al., 1997; Welch, 2001; Graham et al., 2007). Isto se deve, em parte, aos programas de melhoramento genético vegetal, que estão voltadas para ganho em produtividade, sem a devida consideração pela melhoria da qualidade nutricional do produto. Ao longo das últimas décadas, o aumento de produtividade tem sido o principal objetivo desses programas. No entanto, igualmente importante, mas largamente ignorado, está à concentração e a composição de nutrientes, particularmente os micronutrientes nos grãos e parte comestível das culturas (Welch & Graham, 1999a; Cakmak, 2002).

No decorrer da domesticação das plantas houve notório aumento de produtividade das culturas, mas ao mesmo tempo, diminuição da base genética de espécies cultivadas (Ladizinsky, 1998). Nesse contexto, trabalhos realizados por Ortiz-Monasterio et al. (1997), Feil (1997), Calderini & Ortiz-Monasterio (2003) e Garvin et al. (2006), demonstraram que ao longo dos anos, o aumento de produtividade obtido por intermédio do melhoramento vegetal apresenta relação inversa a concentração de micronutrientes nos grãos. Sendo esse um aspecto negativo, já que os seres humanos e animais necessitam de pelo menos 22 elementos minerais para o seu bem estar (Welch & Graham, 2004; White & Broadley, 2005; Graham et al., 2007).

Com a perda de qualidade, em razão da diminuição na concentração de minerais nos produtos agrícolas, haverá necessidade de ingerir maior quantidade para nutrir, o que antes era possível com uma porção menor. O aumento na ingestão de alimentos levará a problemas de obesidade devido ao excesso de carboidratos, por outro lado, se continuar com a mesma quantidade de alimento ingerido, problemas de deficiência nutricional continuarão a se agravar, conforme mostram os históricos dos índices de desnutrição na população mundial.

Dentre os nutrientes com maior frequência de problemas de deficiência destacam-se ferro (Fe), iodo (I), selênio (Se) e zinco (Zn), sendo atualmente os que causam maior preocupação em relação à saúde humana, principalmente nos países em desenvolvimento. Estima-se que um terço da população mundial vive em países considerados de alto risco em relação à deficiência de Zn, sendo sugerido que um quinto da população pode não estar ingerindo este nutriente em quantidades suficientes (Hotz & Brown, 2004). A deficiência de Zn é responsável por graves complicações da saúde humana, incluindo prejuízos no sistema imunológico combinada com maior risco de infecções, prejuizo no crescimento físico, retardo na capacidade de aprendizagem, danos no desenvolvimento do DNA e câncer (Demment et al., 2003; Hotz & Brown, 2004; Gibson, 2006; Prasad, 2007). Segundo Zeitune et al. (2001), o Zn é um elemento essencial, formando parte de enzimas que participam da maioria das principais vias metabólicas, sendo que deficiências leves desse micronutriente pode influir sobre os padrões de crescimento dos adolescentes, em razão de sua atuação em numerosas funções estruturais, bioquímicas e de regulação dos sistemas biológicos.

Com base no pressuposto, uma crescente atenção tem sido dada na procura e identificação dos ancestrais selvagens de plantas cultivadas, em busca de alelos valiosos que foram perdidos devido à erosão genética, com intuito de reintroduzí-los nas plantas cultivadas (Gur & Zamir, 2004). Nesse sentido, diversas pesquisas visando explorar genes associados a concentração de nutrientes, por meio da biotecnologia e melhoramento convencional de plantas, têm sido realizadas, e mostrando ser um caminho promissor para melhorar a qualidade dos alimentos vegetais, sendo este o foco dos programas de bioforticação (Graham, 2003). A biofortificação é um processo visa aumentar o conteúdo de nutrientes e vitaminas nas partes comestíveis das culturas, fornecendo uma solução sustentável para a desnutrição no mundo (Jeong & Guerinot, 2008). O conceito de biofortificação é atrativo não somente para melhorar as condições de crescimento das culturas, mas também para explorar o potêncial de uma planta para mobilização e utilização de micronutrientes. Variedades biofortificadas apresentam o potencial de fornecer benefícios contínuos, ano após ano, nos países em

desenvolvimento, a um custo recorrente inferior ao da suplementação e da fortificação pós-colheita (Graham & Welch, 1996; Welch, 2001; HarvestPlus, 2004; Graham et al., 2007). Desta forma, a biofortificação complementa outras intervenções e é um meio para fornecer nutrientes, vitaminas e proteínas para as pessoas mais vulneráveis, de forma relativamente barata e usando uma intervenção agrícola mais sustentável (Bouis, 1999; Nestel et al., 2006; Pfeiffer & McClafferty, 2007; Qaim et al., 2007). Nesse contexto, várias estratégias e/ou intervenções para a biofortificação de culturas tem surgido, incluindo estratégias de manejo e adubação, melhoramento convencional e abordagens utilizando transgenia (Zhu et al., 2007; Mayer et al., 2008).

A utilização de fertilizantes objetivando aumentar a concentração de micronutrientes na parte comestível dos produtos agrícolas foi denominada de "biofortificação agronômica" e pode ser realizada por meio do tratamento de sementes, adubação via solo ou pela aplicação foliar (Welch, 2008). Outras práticas de manejo como a aplicação de biofertilizantes (inoculação com fungos micorrízicos, tricodermas, etc), rotação de culturas e irrigação também podem ser adotadas visando aumentar a concentração de minerais nos produtos agrícolas (Moraes et al., 2009). A aplicação de fertilizantes minerais para bifortificação é defendida como estratégia não somente para aumentar as concentrações dos minerais em culturas comestíveis, mas também para melhorar a produtividade em solos inférteis (Graham et al., 2001; Bouis et al., 2003; Genc et al., 2005; White & Broadley, 2005; Graham et al., 2007; Pfeiffer & McClafferty, 2007).

Com o propósito de avaliar os benefícios da biafortificação agronômica, pesquisas realizadas no Brasil, Austrália e Índia com adubação de Zn no solo, demonstraram aumentos na concentração do mesmo nos grãos de cereais. O incremento na concentração de Zn nos grãos também traduziu-se muitas vezes em aumento na concentração de Fe (Moraes et al., 2009; Graham et al., 1992; Shiway et al., 2008). Nesse contexto, Cakmak et al. (2004) e Distelfeld et al. (2007), observaram positiva correlação entre concentração de Zn e de proteína nos grãos. Relatos da positiva relação entre Zn, Fe e proteínas nos grãos, estimularam novos trabalhos, os quais relataram que dependendo do ambiente e do método de aplicação de fertilizantes com Zn, podem aumentar a concentração do mesmo nos grãos em até três ou quatro vezes. O método mais eficaz para aumentar a concentração de Zn nos grãos tem sido a aplicação no solo conciliado à pulverização foliar (Yilmaz et al., 1997; Peleg et al., 2008; Cakmak et al., 2010a).

Em contra partida, alguns trabalhos tem mostrado relação inversa entre produtividade e concentrações de micronutrientes nos grãos (McDonald et al., 2008; Murphy et al., 2008). Segundo White & Broadley (2005), variedades melhoradas com o propósito de aumentar as concentrações de nutrientes nas partes comestíveis poderia ser uma consequência do crescimento mais lento da planta, reduzida produtividade, baixo índice de colheita ou sementes menores. Outros pesquisadores sustentam a hipótese de um efeito de diluição ao longo do tempo (Garvin et al., 2006; Fan et al., 2008). Efeito esse, decorrente do aumento exessivo da produtividade e reduzido de minerais, além da atuação de fatores externos, podendo em partes interferir nesse aspecto.

Apesar de algumas divergências, é perceptível o avanço na área da biofortificação. Avanços esses, possibilitados pela ação conjunta de programas, como: HarvestPlus, que visa reduzir a subnutrição de micronutrientes, com a utilização de culturas de alimentos básicos que são ricos em nutrientes, obtidos através de um processo chamado de biofortificação de reprodução, ou seja, através do melhoramento genético vegetal (HarvestPlus, 2004). Paralelo a esse programa foi criado a HarvestZinc, com foco em explorar e testar o uso de fertilizantes para melhorar a concentração de Zn em diversas culturas de alimentos básicos, particularmente o trigo e o arroz. Por tanto, disponibilizando material e tecnologias para obtenção de alimentos nutritivos e de altos rendimentos. Porém, existe a necessidade de unificar as áreas de estudos, ou seja, o potencial genético com estratégias de adubação.

De acordo com HavestPlus (2009), para o trigo há variações na concentração de Zn nos grãos, na ordem de 27-37 mg kg^{-1}, com média de 31 mg kg^{-1}. No entanto, a concentração alvo do Programa HarvestPlus de Biofortificação é de 41 mg kg^{-1}. Dessa forma, justificando a necessidade de novos estudos no tema, para proporcionar subsídios científicos e tecnológicos suficientes para obtenção dos níveis nutricionais exigidos para o trigo. Para produção de alimentos em quantidade e qualidade, será necessária a adoção de sistemas integrados de produção agrícola, nos quais o manejo da fertilidade do solo, adubação e o melhoramento de plantas estejam baseados não somente nas exigências das culturas ou no aumento de produtividade, mas também no fornecimento adequado de nutrientes aos animais e ao homem.

Assim, a missão não está apenas em aumentar a produtividade, e sim romper esse paradigma e começar a olhar também para qualidade nutricional dos alimentos, que poderá levar a obtenção de produtos agrícolas que nutrem, e não apenas alimentam. Para isso, faz-se importante a avaliação de estratégias para biofortificação de plantas que estão presentes no cardápio da maioria da população, inclusive daqueles de classes menos favorecidas, sem

prejudicar os componentes agronômicos de produtividade. Por isso, objetivou-se com esse trabalho, correlacionar variáveis associadas à qualidade nutricional (teor de Zn, Fe e proteínas nos grãos) com os componentes agronômicos de cultivares de trigo, em razão das estratégias de adubação com Zn e variações nos ambientes de cultivo.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

O experimento foi instalado em dois ambientes:

2.1.1 PALOTINA

Localizado no Sul do Brasil e Oeste paranaense (Figura 1). O clima, conforme classificação de Koppen é caracterizado como Cfa (subtropical úmido mesotérmico), com verões quentes e invernos frios ou amenos. A temperatura média anual é de 20°C, preciptação pluviométrica média anual de 1600 mm e altitude de 332 m, com geadas no período frio.

A área experimental localizada na Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC), coordenadas 24°21′10.37″ S e 53°45′26.57″ W. O solo era muito argiloso, classificado como: LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, segundo EMBRAPA (2006).

2.1.2 CASCAVEL

Situado no Sul do Brasil e Oeste Paranaense (Figura 1). Conforme classificação de Köppen, possui região climática Cfb (subtropical mesotérmico superúmido). A temperatura média anual é de 19 °C, altitude de 785 m e com ocorrência de geadas.

A área experimental estava localizada na COODETEC, situada nas coordenadas 24°52'33.51" S e 53°31'48.45" W. O solo era muito argiloso, classificado como: LATOSSOLO VERMELHO Eutroférrico, segundo EMBRAPA (2006).

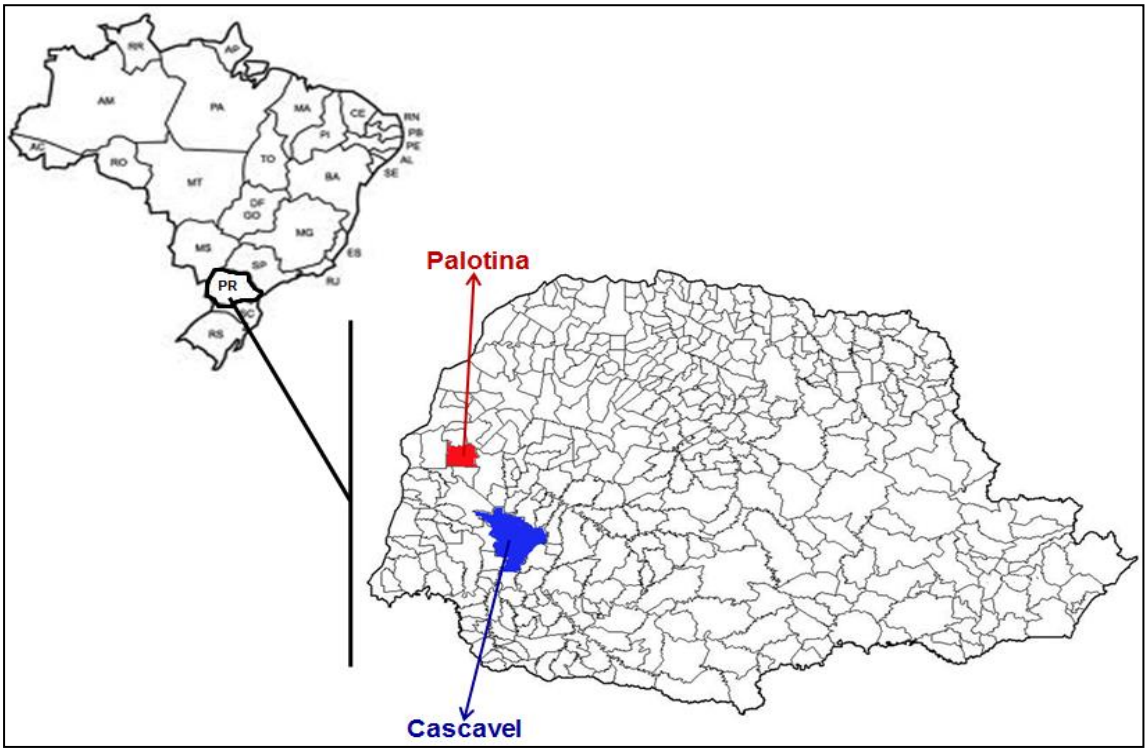
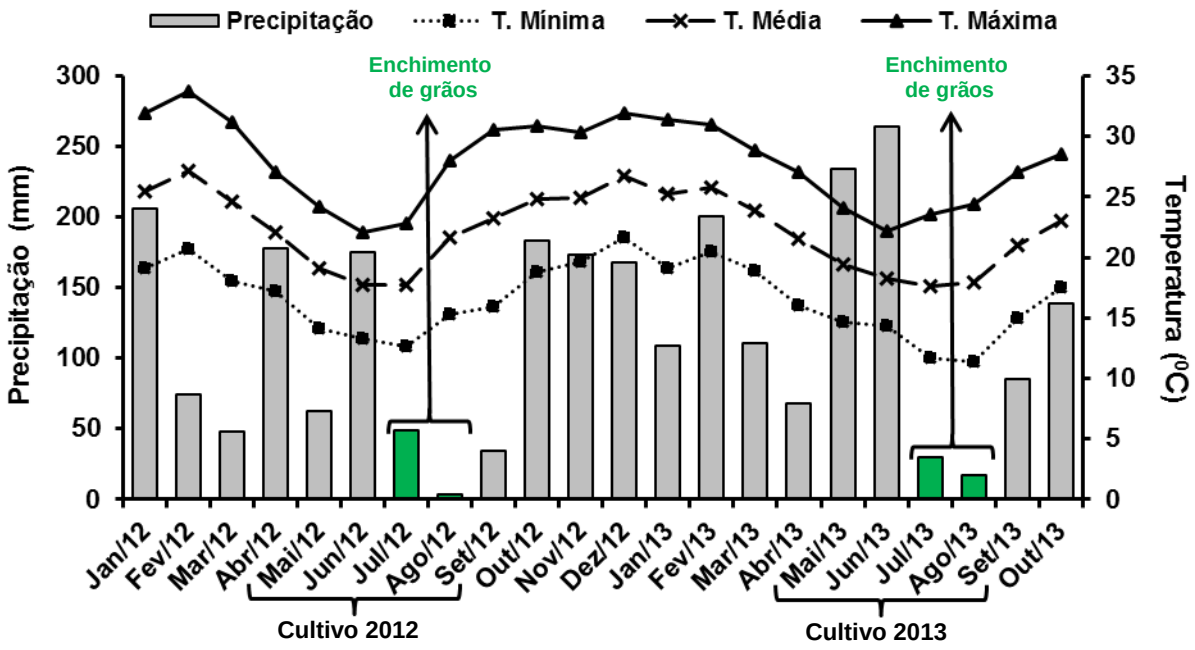


Figura 1: Mapa de localização dos ambientes: Palotina e Cascavel, estado do Paraná.

Abaixo seguem os dados de caracterização climática referente ao período de condução da cultura: Jan/2012 a Out/2013, para os dois ambientes de cultivo (Figuras 2a e 2b).

(a)



(b)

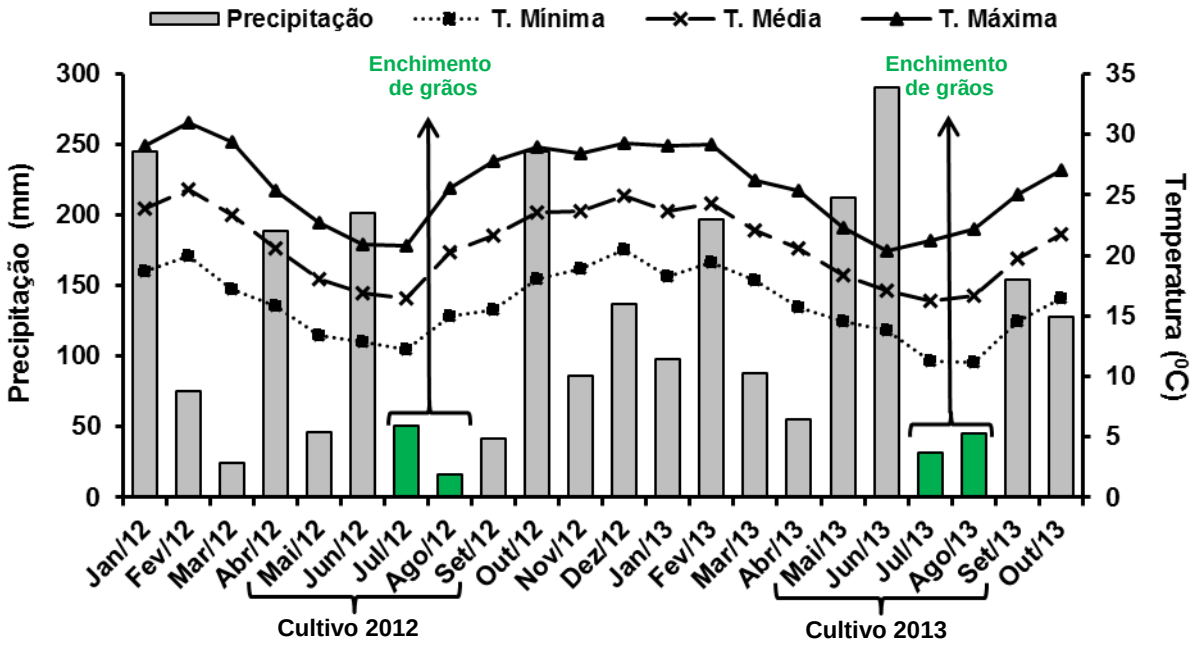


Figura 2: Dados climatológicos referente ao período de desenvolvimento dos experimentos em Palotina-PR (a) e Cascavel-PR (b).

Fonte: Somar meteorologia, 2013.

2.2 INSTALAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

O cultivo do trigo foi realizado a campo, em sistema de plantio direto, nos anos agrícolas de 2012 e 2013. Dessa forma, foram realizados quatro experimentos, obtendo-se dados de dois anos em dois locais distintos. Cada ano correspondeu à um experimento, com o emprego dos mesmos tratamentos e manejos culturais, de acordo com as indicações técnicas para a cultura do trigo. Importante relatar ainda, que alterou a área de plantio de um ano para outro, assim evitando a efeito residual da aplicação do Zn.

2.3 TRATAMENTO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Cada ambiente correspondeu a um experimento, cujo delineamento experimental foi blocos completos casualizados, no esquema fatorial 4 x 2 (tratamentos x cultivares), com 4 repetições, totalizando 32 parcelas.

Em cada experimento os tratamentos consistiram de: (i) sem aplicação de Zn (controle); (ii) aplicação de Zn no solo (Zn-S); (iii) aplicação de Zn na folha (Zn-F) e (iv) aplicação de Zn no solo e na folha (Zn-S+F). A aplicação de Zn no solo foi realizada no momento do plantio, utilizando dois formulados N-P_2O_5-K_2O (8-30-20) na dose de 250 kg ha^{-1}, sendo um sem Zn e outro com 4% de Zn na forma de óxido finamente moído, que correspondeu a uma dose de 10 kg ha^{-1} de Zn. Para aplicação de Zn na folha utilizou-se uma solução com 2% de Sulfato de Zinco Penta-Hidratado ($ZnSO_4.5H_2O$), em taxa de aplicação de 200 L ha^{-1}, correspondendo a 910 g ha^{-1} de Zn. Aplicação foliar foi realizada no estádio de desenvolvimento da cultura que correspondeu ao início do enchimento dos grãos, melhor momento para aplicação foliar (Yilmaz et al., 1997). A dose utilizada, tanto para adubação de Zn no solo quanto via foliar seguiu os padrões sugeridos pelos projetos internacionais de pesquisa em biofortificação agronômica do Programa HarvestZinc (Cakmak et al. 2010; Zou et al. 2012).

Em cada experimento foram utilizadas duas cultivares de trigo, sendo uma a mais cultivada no Paraná, e a outra escolhida com base nas pesquisas de biofortificação do Programa Embrapa-HarvestPlus. Nesse programa, genótipos são selecionados com base em características de desempenho agronômico, qualidades tecnológicas e de potencial para biofortificação (altas concentrações de Zn e Fe), conforme Scheeren et al. (2011). Desta forma, foram selecionados os cultivares CD 150 e BRS Guamirim, correspondendo as cultivares mais plantadas da região e com características para biofortificação, respectivamente.

2.4 TRATOS CULTURAIS

Antes da instalação da cultura foi realizada a análise química e física do solo para cada área utilizada, na profundidade de 0-20 cm, para fins de correção e adubação do solo (Tabela 1). Conforme análise, não foi necessária a aplicação de calcário em nenhum ambiente de cultivo, pois as saturações por bases estavam acima do exigido para cultura do trigo. As operações de adubação, controle fitossanitário e diagnose nutricional (análise foliar), seguiram as recomendações técnicas da região em que foram instalados os experimentos Costa & Oliveira, 2001; Oliveira, 2003).

Tabela 1: Análise química e física do solo de Palotina e Cascavel, nos anos de 2012 e 2013, realizadas antes do cultivo do trigo.

Amostra	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	P	C
	CaCl2	----------cmolc dm-3----------					mg dm-3	g dm-3
	4,83	0,00	5,99	4,28	1,52	0,75	32,34	29,28
Palotina(1) 2012	Cu	Zn	Fe	Mn	S-SO4	Areia	Silte	Argila
	----------mg dm-3----------					----------%----------		
	13,18	4,84	35,31	228,41	10,57	15,53	12,82	71,65
Amostra	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	P	C
	CaCl2	----------cmolc dm-3----------					mg dm-3	g dm-3
	5,34	0,00	4,35	5,85	2,25	0,64	39,30	15,53
Palotina 2013	Cu	Zn	Fe	Mn	S-SO4	Areia	Silte	Argila
	----------mg dm-3----------					----------%----------		
	18,06	4,65	37,59	270,29	19,75	15,53	12,82	71,65
Amostra	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	P	C
	CaCl2	----------cmolc dm-3----------					mg dm-3	g dm-3
	5,12	0,00	6,41	4,47	2,22	0,48	22,93	22,18
Cascavel 2012	Cu	Zn	Fe	Mn	S-SO4	Areia	Silte	Argila
	----------mg dm-3----------					----------%----------		
	5,26	1,82	37,21	56,46	4,61	15,38	13,52	71,10
Amostra	pH	Al	H + Al	Ca	Mg	K	P	C
	CaCl2	----------cmolc dm-3----------					mg dm-3	g dm-3
	5,36	0,00	4,76	4,80	2,68	0,80	45,38	21,44
Cascavel 2013	Cu	Zn	Fe	Mn	S-SO4	Areia	Silte	Argila
	----------mg dm-3----------					----------%----------		
	10,16	5,15	48,45	158,44	3,58	15,38	13,52	71,10

(1)As análises química do solo foram realizadas segundo metodologia da Embrapa (2009), com exceção da determinação de C e S-SO_4 realizadas segundo Raij et al. (2001). DTPA (ICP-OES); Al, Ca e Mg - Cloreto de potássio; P, K, Cu, Zn, Fe e Mn - Mehlich-1; C - Colorimétrica; H + Al - Solução tampão SMP; S-SO_4 Fosfato mono cálcico. As análises física do solo seguiu a metodologia de Camargo et al. (1986).

As unidades amostrais (parcelas) foram compostas de 6 fileiras de 5 m, com espaçamento de plantio de 0,17 m entre fileiras e densidade de 60 sementes por metro linear, totalizando uma área de 5,10 m^2 por parcela. A área útil de cada parcela constituiu das 2 fileiras centrais, descontando-se 0,50 m da bordadura da parcela, restando 1,36 m^2 de área útil.

2.5 VARIÁVEIS RESPOSTAS

As plantas de trigo foram cultivadas até a maturidade fisiológica dos grãos. Ao longo do desenvolvimento da cultura, determinaram-se as variáveis respostas de desenvolvimento, conforme o hábito de crescimento de cada cultivar, como: análise foliar - coleta da folha bandeira no início do florescimento (Malavolta et al., 1997) e afilhamento - contagem do número de afilho por planta, amostragem de cinco plantas por parcela. Foram determinadas também, as variáveis de rendimento e qualidade nutricional dos grãos, como descritas nos itens a seguir:

2.5.1 PRODUÇÃO DE MASSA SECA TOTAL DA PARTE AÉREA (BIOMASSA)

Foram coletadas vinte plantas por parcela ao final do ciclo da cultura e o material foi seco em estufa de circulação forçada a 60^0C até peso constante. Em seguida, determinou-se a massa seca total da parte aérea.

2.5.2 PRODUTIVIDADE E MASSA DE 1000 GRÃOS

Foram determinadas pela colheita da área útil de cada unidade amostral. Após colhido, descontado a umidade e, na sequência extrapolado os dados de produtividade para kg ha^{-1}. Desse mesmo material coletado, realizou a contagem e aferição da massa de 1000 grãos. A colheita e a retirada da casca dos grãos, foram realizadas de forma manual, seguindo procedimentos do Programa HarvestPlus de Biofortificação (Stangoulis & Sison, 2008), com intuito de evitar a contaminação das amostras para a análise nutricional dos grãos.

2.5.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DO GRÃO

Para determinação dos macronutrientes e micronutrientes no tecido vegetal (grãos sem casca e folhas), foi aferido 0,25 g de cada amostra e digerido as mesmas com ácido nítrico (HNO_3), sob sistema fechado em forno micro-ondas modelo Mars Xpress (CEM), com posterior quantificação em ICP-OES (Malavolta et al., 1997). Para

determinação do N-total no tecido vegetal, aferiu-se 0,1 g de massa seca e procedeu-se a digestão com ácido sulfúrico (H_2SO_4) em bloco digestor, com posterior quantificação pelo método analítico Kjeldahl (Bremner & Edwards, 1965). O teor de proteína dos grãos foi obtido pela multiplicação do teor de N-total pelo fator geral de conversão (6,25). Amostras tecido vegetal (*Vicia fava*, IPE 903) e (*Phaseolus vulgaris*, IPE 192) certificadas pela Wageningen Evaluating Programs for Analytical Laboratories (International Plant-Analytical Exchange) foram utilizadas para garantir o controle de qualidade das análises.

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Foi realizado teste de homogeneidade das variâncias e os resultados submetidos à análise de variância (teste F). Quando significativos, foram comparados por meio do teste de Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade (Zimmermann, 2004). Para determinação do grau de associação/dependência entre as variáveis, foi efetuada análise multivariada e teste de correlação linear de Pearson, utilizando-se os softwares CANOCO (Ter Braak & Smilauer, 2002) e SAS (Pimentel-Gomes & Garcia, 2002), respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 PALOTINA

3.1.1 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA

Houve diferença estatística entre os cultivares CD 150 e BRS Guamirim para os anos 2012 e 2013, quando comparado os tratamentos controle e Zn-S (Tabela 2). Observou-se que aplicação de 10 kg ha^{-1} de Zn no solo (Zn-S), proporcionou maiores níveis de Zn nas folhas de trigo, com exceção ao cultivar CD 150 no ano 2013. Esses aumentos foram pequenos em relação à quantidade de Zn aplicado no solo, fato esse, que pode ser explicado pelos níveis de Zn no solo estarem acima do crítico para a cultura do trigo, como mostrado na Tabela 1. Observa-se também, que os teores de Zn nas folhas, com exceção para o cultivar CD 150 no ano de 2013, apresentavam em níveis adequados para a cultura do trigo, estando entre 20 a 40 mg kg^{-1}, conforme proposto por Malavolta et al. (1997).

Aplicação de Zn no solo aumentou os teores de B, com exceção ao cultivar BRS Guamirim no ano 2012. Para os demais nutrientes houve aumentos não significativos da aplicação de Zn sobre os teores foliares de Ca, Mg e P. O aumento da disponibilidade de Zn para as plantas pode influenciar os demais nutrientes de forma indireta, como observado neste trabalho para B, Ca, Mg e P. Resultados semelhantes foram observados por Cayton et al. (1985), os quais relataram a influência do Zn no aumento do transporte de Ca, Mg, Cu e Fe para parte superior de plantas de arroz. Por outro lado, Fageria & Baligar (2005) observaram que o fornecimento de níveis adequados de Zn gerou efeito positivo sobre a absorção de Cu e Mn na cultura do arroz, comportamento não observado no presente trabalho.

Tabela 2: Teores foliares médios de macro e micronutrientes nos cultivares de trigo CD 150 e BRS Guamirim sob influência da aplicação de zinco no solo. Palotina, ano 2012 e 2013 (cada ano um experimento).

Nutrientes[1]	2012				2013			
	CD 150		BRS Guamirim		CD 150		BRS Guamirim	
	Controle[2]	Zn-S	Controle	Zn-S	Controle	Zn-S	Controle	Zn-S
	----------g kg^{-1}----------							
N	37,80 a[3]	37,98 a	36,08 a	37,21 a	26,31 a	26,33 a	23,76 b	26,96 a
P	2,12 a	2,20 a	2,03 a	2,20 a	1,78 a	1,84 a	1,84 a	1,94 a
K	16,40 a	17,16 a	20,28 a	21,63 a	16,13 a	15,73 a	16,34 a	15,40 a
Ca	3,85 a	4,15 a	3,99 a	4,11 a	4,88 a	4,75 a	3,01 a	3,22 a
Mg	1,63 b	1,89 a	1,81 b	2,50 a	1,26 a	1,42 a	0,93 a	0,93 a
S	2,57 a	2,60 a	2,83 a	2,99 a	2,41 a	2,28 a	2,68 a	2,71 a
	----------mg kg^{-1}----------							
Cu	7,77 a	7,84 a	6,73 a	6,43 a	8,58 a	9,30 a	6,72 b	7,32 a
Zn	19,28 b	21,33 a	20,25 b	23,37 a	14,68 a	15,22 a	21,77 b	24,62 a
Fe	140,48 a	144,27 a	175,43 b	207,05 a	107,67 a	107,84 a	99,20 a	100,27 a
Mn	120,38 a	108,63 a	141,97 a	138,43 a	117,80 b	137,38 a	86,41 a	91,81 a
B	26,88 b	36,11 a	40,57 a	37,70 a	15,36 b	17,69 a	18,82 b	22,46 a

[1]Macro e micronutrientes determinados conforme metodologia de Malavolta et al. (1997), com exceção para o N, obtido de acordo com Bremner & Edwards (1965). [2] Controle (sem aplicação de Zn) e Zn-S (aplicação de 10 kg ha^{-1} de Zn no solo). [3] Médias seguidas pela mesma letra na horizontal (comparação entre tratamentos da mesma cultivar) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

3.1.2 COMPONENTES AGRONÔMICO DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE

Avaliando-se o efeito dos tratamentos individualmente para cada cultivar, observou-se diferença estatística na produtividade para o cultivar CD 150 nos anos 2012 e 2013, entretanto, para as demais variáveis: afilhamento, biomassa e massa de 1000 grãos, não houveram diferenças significativas (Tabela 3). Com relação à produtividade do cultivar CD 150, nota-se destaque para os tratamentos Zn-S e Zn-S+F, os quais produziram 2222 kg ha^{-1} e 2155 kg ha^{-1} respectivamente, correspondendo a um acréscimo de 20% e 16%, quando comparados ao tratamento controle (ano de 2012). Para o ano 2013, destacou-se somente para o tratamento Zn-S, com produtividade de 2357 kg ha^{-1}, sendo 24% superior ao controle. Menor magnitude de resposta à adubação com Zn também foi observada para a produtividade do cultivar BRS Guamirim nos mesmos tratamentos, caracterizando aumentos de 13% e 12% para o ano 2012, respectivamente e aumento de 17% para o ano 2013, comparando ao tratamento controle.

Nesse contexto, aumentos de produtividade para o trigo também foram obtidos por Yilmaz et al. (1997) e Cakmak et al. (2010a), quando avaliaram métodos de aplicação de Zn para biofortificação do trigo. Ressalva-se nesses trabalhos, que as condições ambientais e de fertilidade eram distintas das encontradas no presente estudo, pois tratava-se de solos alcalinos e deficientes em Zn. Na cultura da soja, Inocêncio et al. (2012), trabalhando em solo com níveis de Zn acima do crítico, obtiveram resposta de produtividade com adubação de Zn, sugerindo a necessidade de se rever o conceito de nível crítico para Zn na cultura, em solos brasileiros. No presente trabalho os teores iniciais de Zn disponível no solo situavam-se acima de 4 mg dm^{-3} de Zn (Tabela 1), ou seja, valores bastante superiores ao nível crítico (1 mg dm^{-3} Zn, Galrão, 2004). Ainda assim, as adubações com Zn no solo proporcionaram aumentos significativos na produtividade do cultivar CD 150 e efeitos menos pronunciados na produtividade do cultivar BRS Guamirim, caracterizando nessas condições o Zn como fator limitante.

Comparando-se os resultados entre cultivares, houve diferença estatística para afilhamento e produtividade em ambos os anos, não ocorrendo o mesmo para biomassa e massa de 1000 grãos (Tabela 3). Nota-se para o afilhamento, de forma geral, que o cultivar BRS Guamirim apresentou maior numero de afilhos, quando comparado com o cultivar CD 150. O maior número de afilhos no cultivar BRS Guamirim parece ser um aspecto fisiológico positivo para relação fonte/dreno, favorecendo uma maior translocação de nutrientes para as

partes comestíveis. Desta forma, essa característica deve ser considerada pelos programas de melhoramento voltados para biofortificação de culturas alimentares. Possivelmente a melhor partição de fotoassimilados em razão ao maior número de afilhos, poderá favorecer características importantes associadas a maior concentração de nutrientes nas partes comestíveis, podendo ser utilizada para avaliação de genótipos potenciais para biofortificação (Tanksley & McCouch, 1997; Gur & Zamir, 2004).

Com relação ao potencial produtivo, observou-se que o cultivar CD150 foi mais produtivo que o cultivar BRS Guamirim em ambos locais e ao longo de dois anos.

O comportamento do número de afilhos e da produtividade pode estar associado às diferenças genéticas entre os cultivares. De acordo com Feil (1997), Calderini & Ortiz-Monasterio (2003) e Garvin et al. (2006), cultivares com características para biofortificação, como é o caso do BRS Guamirim, apresentam menor rendimento e maior concentração de nutrientes nos grãos. Com base nos resultados, pode-se aventar também que o maior número de afilhos faça a planta gastar mais energia para produção de biomassa, em detrimento da produção de grãos. Todavia, no presente trabalho não houve diferença na produção de biomassa entre as duas cultivares (Tabela 3).

Tabela 3. Influência dos métodos de aplicação de zinco no afilhamento, biomassa, produtividade e massa de 1000 grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Palotina, ano 2012 e 2013.

Cultivar	2012				2013			
	Controle[(1)]	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F	Controle	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F
				Afilhamento (n^0/planta)				
CD 150	4,6 a B[(2)]	4,2 a B	4,9 a A	4,4 a B	3,8 a B	4,1 a A	3,9 a B	3,8 a A
BRS Guamirim	5,3 a A	5,0 a A	5,2 a A	5,2 a A	4,5 a A	4,2 a A	4,3 a A	4,1 a A
				Biomassa (g/20 plantas)				
CD 150	45,4 a A	43,6 a A	45,9 a A	46,2 a A	42,3 a A	51,3 a A	43,3 a A	50,5 a A
BRS Guamirim	40,5 a A	48,3 a A	47,5 a A	44,7 a A	39,0 a A	45,8 a A	40,0 a A	45,0 a A
				Produtividade (kg ha^{-1})				
CD 150	1854 b A	2222 a A	1898 b A	2155 a A	1897 b A	2357 a A	2029 b A	2076 b A
BRS Guamirim	1612 a A	1823 a B	1615 a B	1798 a B	1723 a A	2017 a B	1824 a A	1900 a A
				Massa de 1000 grãos (g)				
CD 150	47,4 a A	45,5 a A	46,1 a A	46,9 a A	32,8 a A	34,8 a A	32,9 a A	33,7 a A
BRS Guamirim	46,1 a A	46,2 a A	44,0 a A	45,2 a A	29,6 a A	32,0 a A	30,3 a A	31,3 a A

[(1)] Métodos de aplicação: Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar). [(2)]Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal (entre tratamentos da mesma cultivar) e maiúscula na vertical (entre cultivares).

3.1.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DOS GRÃOS

Quanto à qualidade nutricional dos grãos, avaliando-se o efeito entre tratamentos para cada cultivar, não houve diferença significativa para concentração de Zn, Fe e proteína nos grãos no ano 2012. Por outro lado, em 2013, houve efeito dos tratamentos sobre as variáveis respostas associadas à qualidade nutricional dos grãos (Tabela 4).

Para o ano de 2012, apesar de não ocorrido diferença significativa, nota-se tendência de aumento da concentração do Zn, quando realiza a adubação com o elemento para os dois cultivares. Os tratamentos que proporcionaram maiores aumentos nos teores de Zn do cultivar CD 150 foram: Zn-S (39,7 mg kg^{-1}) e Zn-S+F (39,7 mg kg^{-1}), correspondendo ao acréscimo de 16%, quando comparado ao controle (34,3 mg kg^{-1}). Quanto ao cultivar BRS Guamirim, os tratamentos Zn-F (49,6 mg kg^{-1}) e Zn-S+F (54,7 mg kg^{-1}), proporcionaram os maiores aumentos, sendo 5% e 16% superiores ao controle (47,3 mg kg^{-1}), respectivamente (Tabela 4). Houve nítido aumento na concentração de Fe quando realizada adubação com Zn também, caracterizando aumento indireto proporcionado pelo acréscimo de Zn nos grãos. Esses resultados corroboram com os de Moraes et al. (2009), que observaram incremento na concentração de Zn nos grãos em razão da adubação com Zn, acompanhado de leves aumentos na concentração de Fe também.

No ano de 2013 observou-se efeito significativo para concentração de Zn nos grãos do cultivar BRS Guamirim, com destaque para os tratamentos: Zn-F (72,2 mg kg^{-1}) e Zn-S+F (77,4 mg kg^{-1}), sendo essas concentrações, 40% e 50% respectivamente, superiores ao observado para o tratamento controle (51,7 mg kg^{-1}). Em relação à concentração de Fe, observou-se efeito significativo no cultivar CD 150, destacando-se o tratamento Zn-S+F (45,3 mg kg^{-1}), correspondendo a uma concentração 10% superior ao controle (41,2 mg kg^{-1}). Quanto a proteína, verificou-se efeito significativo para o cultivar CD 150, com superioridade dos tratamentos: Zn-S (20,1%) e Zn-S+F (20,8%), sendo 22% e 26% superior ao tratamento controle (16,5%), (Tabela 4).

Quanto à concentração de Zn nos grãos, é importante enfatizar ainda a diferença da concentração do elemento entre os anos, onde em 2013 a concentração de Zn foi maior em todos os tratamentos e cultivares. Com base no ocorrido, uma das prováveis explicações é devido às diferenças climáticas, uma vez que fatores como temperatura e precipitação podem influenciar na absorção dos nutrientes pelas plantas. No ano de 2013 ocorreu maior e melhor distribuição da precipitação (Figura 2a), comprovando a influência do ambiente na magnitude de resposta ao zinco. Segundo Wilkinson et al. (1968), o transporte de

Zn no solo para a superfície da raiz ocorre predominantemente através da difusão e esse processo é altamente sensível a umidade, pois fornece meio apropriado para adequada difusão do Zn até raízes das plantas (Rattane & Deb, 1981; Marschner, 1993). O correto funcionamento da difusão durante o ciclo da cultura, facilitará maior concentração de Zn próximo as raízes e, consequentemente, maior probabilidade de absorção e transporte do Zn para caule, folhas e sementes.

Nos últimos anos um progresso considerável no aumento da concentração de Zn nos grãos foi obtido utilizando métodos de aplicação do elemento (Cakmak, 2008; Peck et al., 2008; Cakmak et al., 2010a; Zhang et al., 2010a). Nesses trabalhos, o método que tem se mostrado mais eficaz para aumentar a concentração de Zn nos grãos é aplicação do nutriente no solo conciliada à aplicação via foliar, podendo alcançar aumentos de até três a quatro vezes na concentração de Zn nos grãos, em relação ao tratamento controle. Os resultados do presente trabalho corroboram com os relatados na literatura, pois o tratamento que conciliou aplicação no solo e via foliar (Zn-S+F) apresentou maior acréscimo em concentração de Zn nos grãos em ambos os anos e locais.

Comparando o comportamento entre cultivares, houve diferença significativa, para concentração de Zn e Fe nos grãos no ano 2012, e Fe e proteína nos grãos do ano de 2013 (Tabela 4). O cultivar BRS Guamirim apresentou maiores concentrações de Zn e Fe nos grãos, quando comparado ao cultivar CD 150, no ano de 2012. Para o ano de 2013, o cultivar BRS Guamirim apresentou maiores concentrações de Fe e proteína, não diferindo estatisticamente em relação a concentração de Zn nos grãos.

Esses resultados eram esperados, pois o cultivar BRS Guamirim tende a concentrar mais nutriente nos grãos e maiores níveis de proteína, visto que trata-se de uma cultivar com característica de biofortficação (Garvin et al., 2006). Tem sido recorrente cultivares com características de biofortificação apresentarem maiores concentrações de nutrientes e proteínas e, em contra partida, menores produtividades. Tal padrão de resposta tonou-se uma das preocupações dos programas de melhoramento genético voltados para biofortificação. Nesse contexto, recentes trabalhos tem mostrado ser possível selecionar cultivares que conciliam altas concentrações de nutrientes e produtividades (Graham et al., 2001; Lyons et al., 2003), sendo esse o foco da biofortificação.

Tabela 4. Influência dos métodos de aplicação de zinco na concentração de Zn, Fe e proteína nos grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Palotina, ano 2012 e 2013.

Cultivar	2012				2013			
	Controle[(1)]	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F	Controle	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F
				Concentração de Zn (mg kg^{-1})				
CD 150	34,3 a B[(2)]	39,7 a A	36,3 a B	39,7 a B	50,6 a A	52,8 a A	62,2 a A	69,7 a A
BRS Guamirim	47,3 a A	47,7 a A	49,6 a A	54,7 a A	51,7 b A	58,1 b A	72,2 a A	77,4 a A
				Concentração de Fe (mg kg^{-1})				
CD 150	47,2 a B	52,2 a B	51,4 a B	52,4 a B	41,2 b A	39,7 b A	36,8 b B	45,3 a A
BRS Guamirim	62,2 a A	65,4 a A	64,0 a A	65,1 a A	42,6 a A	43,3 a A	45,4 a A	45,7 a A
				Proteína (%)				
CD 150	16,6 a A	16,6 a A	15,8 a A	17,0 a A	16,5 b B	20,1 a A	17,5 b B	20,8 a A
BRS Guamirim	16,3 a A	17,2 a A	16,3 a A	17,2 a A	19,5 a A	20,4 a A	20,1 a A	21,0 a A

[(1)]Métodos de aplicação: Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar). [(2)]Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal (entre tratamentos da mesma cultivar) e maiúscula na vertical (entre cultivares).

3.1.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS RESULTADOS

Conforme resultados da análise multivariada dos dados de Palotina, ano 2012 e 2013 (Figuras 3a e 3b), observa-se que o comportamento das variáveis resposta em função dos cultivares e tratamentos foram similares entre os anos de cultivo. De forma geral, o cultivar CD 150 relacionou-se com as maiores produtividade e o BRS Guamirim com maior número de afilho e concentrações de Zn, Fe e proteína nos grãos, confirmando os resultados apresentados anteriormente (Tabelas 3 e 4). A análise conjunta dos dados permite inferir que houve comportamento inversamente proporcional entre produtividade e as demais variáveis, como: afilho, concentrações de nutrientes e proteínas nos grãos e, comportamento diretamente proporcional entre concentrações de nutrientes e proteínas.

Os resultados do presente trabalho corroboram com informações obtidas na literatura, as quais na maioria dos casos, relatam relação inversa entre produtividade e concentração de nutrientes em grãos de cereais (Garvin et al., 2006; McDonald et al., 2008). Quanto à relação entre Zn, Fe e proteína, verifica-se relação direta e positiva, conforme observado em espécies vegetais como o trigo (Peterson et al., 1986; Morgounov et al., 2007) triticale (Feil & Fossati, 1995), milho (Banziger & Longa, 2000) e soja (Raboy et al., 1994). Essas informações são de grande relevância, uma vez que podem direcionar foco dos programas de melhoramento voltados para biofortificação, para obtenção de cultivares com carateristicas de associar altos rendimento e nutrientes nos grãos, visando à questão social de melhoria da saúde da população e de sustentabilidade da atividade.

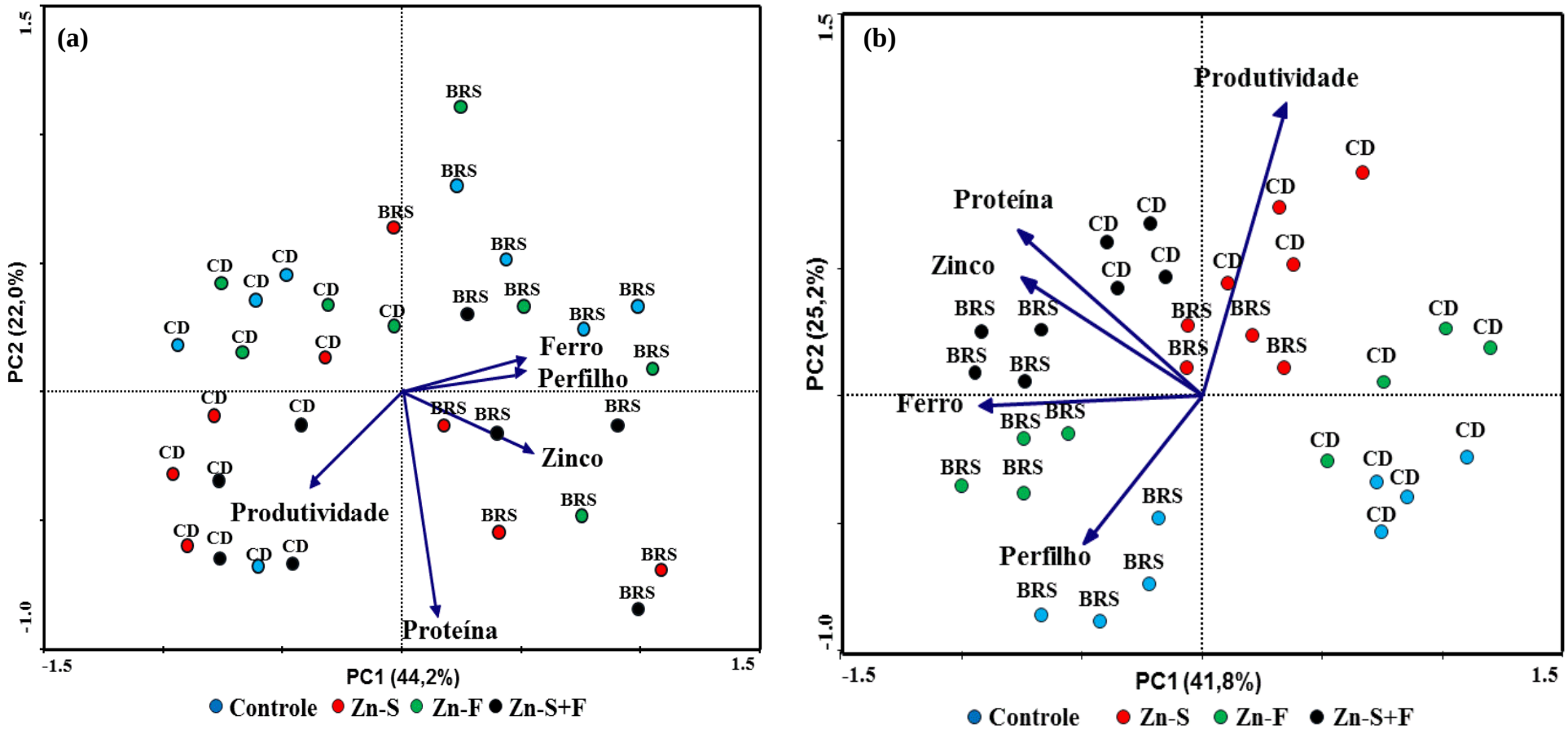


Figura 3: Análise de componentes principais dos cultivares de trigo CD 150 (CD) e BRS Guamirim (BRS), Palotina, ano 2012 (a) e 2013 (b), em função dos métodos de aplicação: Controle (Sem aplicação) Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar).

Os resultados das relações entre variáveis respostas evidenciam correlação negativa e significativa entre produtividade e concentração de Zn (-0,36%) e correlações positivas e significativas entre: afilhamento e concentração de Zn (0,43%); afilhamento e concentração de Fe (0,47%); concentração de Zn e concentração de Fe (0,53%) e concentração de Zn e proteína (0,31%), no ano de 2012. Quanto o ano de 2013, observou-se correlações negativas e significativas entre: produtividade e afilhamento (-0,30%) e produtividade e concentração de Fe (-0,32%) e, correlações positivas e significativas entre: afilhamento e proteína (0,35%); concentração de Zn e concentração de Fe (0,59%) e concentração de Zn e proteína (0,38%) **(**Tabela 5).

Nesse sentido, diversas correlações significativas de natureza de qualidade nutricional de grãos têm sido observadas na literatura: correlação positiva entre concentrações de Zn, Fe e proteína nos grãos de cereais (Peterson et al., 1986; Zebarth et al., 1992; Zhao et al., 2009; Gomez-Becerra et al., 2010a); entre concentração de Zn e Fe (Cakmak et al., 2004; Morgounov et al., 2007); entre concentração de Zn e proteína (Kutman et al., 2011a,b) e entre concentração de proteína e Fe (Cakmak et al., 2004; Distelfeld et al., 2007). Diversas explicações têm sido relatadas visando elucidar a origem dessas correlações: Uauy et al. (2006) e Waters et al. (2009), mostraram evidências moleculares na remobilização e translocação de Zn, Fe e proteínas para os tecidos vegetais (como grãos), sendo regulados por mecanismos genéticos semelhantes. Recentemente, Cakmak et al. (2010b), relataram que a correlação positiva entre Zn, Fe e proteína nos grãos, está associada a co-localização no loci do mesmo cromossomo, indicando assim, relações estreitas entre mecanismos moleculares e fisiológicos. Assim, os genes que codificam alta concentração de Zn, Fe e proteína apresentam relação bastante estreita.

Tabela 5. Correlação de Pearson entre produtividade, afilhamento, concentração de Zn, Fe e proteína em trigo, cultivados em Palotina, ano 2012 e 2013.

Variável	Produtividade	Afilhamento	Conc. Zn	Conc. Fe	Proteína
			2012		
Produtividade	1,00 (1)				
Afilhamento	-0,29^{ns}	1,00			
Conc. Zn	-0,36**	0,43**	1,00		
Conc. Fe	-0,28^{ns}	0,47***	0,53***	1,00	
Proteína	0,06^{ns}	0,10^{ns}	0,31*	0,01^{ns}	1,00
			2013		
Produtividade	1,00				
Afilhamento	-0,30*	1,00			
Conc. Zn	-0,16^{ns}	0,05^{ns}	1,00		
Conc. Fe	-0,32*	0,25^{ns}	0,59***	1,00	
Proteína	0,25^{ns}	0,35*	0,38**	0,44**	1,00

(1) ***, **, *, ^{ns}, significativo ao teste de correlação de Pearson a 1%, 5%, 10% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

3.2 CASCAVEL

3.2.1 ESTADO NUTRICIONAL DA PLANTA

Houve diferença estatística entre os cultivares CD 150 e BRS Guamirim para o ano de 2012 e diferença estatística apenas para o cultivar CD 150 no ano de 2013, quando comparados os tratamento controle e Zn-S (Tabela 6). Nota-se que os teores de Zn nas folhas de trigo aumentaram com a adubação contendo esse micronutriente no solo e, consequentemente proporcionou, em alguns casos, aumentos dos teores foliares de Mn e B. Os aumentos de Mn e B podem estar associados com algum caso de sinergismo entre os nutrientes ou efeitos indiretos na produção de biomassa.

O aumento do teor de Zn nas folhas foi pequeno em relação à dose aplicada no solo (10 kg ha^{-1} de Zn), podendo ser explicado pelo elevado teor inicial do elemento no solo (Tabela 1). Observa-se também, que os teores de Zn nas folhas, com exceção para o cultivar CD 150 no ano de 2013, apresentavam-se em níveis adequados para a cultura do trigo, estando entre 20 a 40 mg kg^{-1}, conforme proposto por Malavolta et al. (1997), resultados esses, semelhantes aos de Palotina. O adequado suprimento de Zn durante todo o desenvolvimento das plantas favorece uma melhor translocação do elemento para órgãos de reserva, como grãos. No entanto, quando em condições de deficiência, mesmo que momentânea, ocorre redução da translocação do elemento (Bataglia, 1991). Os resultados

deste estudo corroboram com Pearson & Rengel (1994), que observaram comportamento diferenciado na translocação de Zn entre plantas de trigo crescidas em condições de suficiência e deficiência em Zn, sendo que plantas crescidas em condição de suficiência translocaram maiores quantidades que plantas crescidas em condição de deficiência.

O aumento dos níveis de Zn nas folhas observado nos ambientes Palotina e Cascavel, além de melhorar o estado nutricional das plantas, desempenha importante papel na biofortificação, pois permite as plantas acumularem maior quantidade de Zn nos grãos. Os tecidos vegetais (caule e folhas), representam importante fonte de reserva de Zn, sendo essas efetivamente remobilizadas para partes comestíveis, como os grãos (Haslett et al., 2001; Kutman et al., 2010; Pearson & Rengel, 1994). Portanto, a manutenção de quantidades elevadas de Zn nos tecidos vegetais contribuirá para o aumento das concentrações de Zn nos grãos, conforme mostrado em recentes estudos de Yilmaz et al. (1997); Cakmak et al. (2010b); Kutman et al. (2010); e Zhang et al. (2012). Avaliando a relação entre estado nutricional em zinco e seus teores nos grãos, Zou et al. (2012) observaram correlação significativa entre a concentração de Zn nas folhas e nos grãos de trigo.

Tabela 6: Teores foliares médios de macro e micronutrientes nos cultivares de trigo CD 150 e BRS Guamirim sob influência da aplicação de zinco no solo. Cascavel, ano 2012 e 2013 (cada ano um experimento).

Nutrientes[1]	2012				2013			
	CD 150		BRS Guamirim		CD 150		BRS Guamirim	
	Controle[2]	Zn-S	Controle	Zn-S	Controle	Zn-S	Controle	Zn-S
	g kg^{-1}							
N	40,03 a[3]	40,26 a	40,89 a	40,10 a	44,51 a	43,62 a	44,21 a	44,11 a
P	2,28 a	2,22 a	2,36 a	2,20 a	2,49 a	2,42 a	2,24 a	2,25 a
K	19,47 a	20,37 a	23,78 a	22,97 a	20,01 a	21,41 a	25,02 a	25,50 a
Ca	4,80 a	4,65 a	4,50 a	4,43 a	4,37 a	4,61 a	4,24 a	4,71 a
Mg	3,79 a	3,49 a	4,40 a	3,77 a	2,41 a	2,46 a	2,30 a	2,50 a
S	2,92 a	2,75 a	3,44 a	3,15 a	3,08 a	3,16 a	3,27 a	3,16 a
	mg kg^{-1}							
Cu	8,03 a	8,20 a	7,28 a	6,67 a	11,85 a	11,90 a	10,78 a	11,05 a
Zn	25,83 b	27,19 a	27,54 b	31,18 a	19,45 a	19,71 a	19,46 a	20,26 a
Fe	273,99 a	297,59 a	259,35a	278,46 a	199,79 a	205,68 a	190,55 a	185,38 a
Mn	87,86 b	100,56 a	90,03 b	100,46 a	104,63 b	114,73 a	112,55 a	114,52 a
B	53,17 a	52,94 a	41,36 b	59,58 a	57,31 b	66,37 a	66,58 a	65,83 a

[1]Macro e micronutrientes determinados conforme metodologia de Malavolta et al. (1997), com exceção para o N, obtido de acordo com Bremner & Edwards (1965). [2] Controle (sem aplicação de Zn) e Zn-S (aplicação de 10 kg ha^{-1} de Zn no solo). [3] Médias seguidas pela mesma letra na horizontal (comparação entre tratamentos da mesma cultivar) não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

3.2.2 COMPONENTES AGRONÔMICOS DE DESENVOLVIMENTO E PRODUTIVIDADE

Semelhante ao ocorrido em Palotina, comparando-se os tratamentos individualmente para cada cultivar, não houve diferença estatística para as variáveis respostas: afilhamento, biomassa, produtividade e massa de 1000 grãos no ano de 2012. No entanto, no ano de 2013, observou-se diferença estatística para produtividade (Tabela 7). Os tratamentos que proporcionaram os maiores rendimento foram: Zn-F (3191 kg ha^{-1}) e Zn-S+F (3250 kg ha^{-1}), correspondendo a um acréscimo de 8% e 10% respectivamente, quando comparados ao tratamento controle (2950 kg ha^{-1}).

Resultados positivos quanto ao aumento de produtividade na cultura do trigo em relação à adubação com Zn, podem estar associados à sensibilidade do trigo a deficiência do elemento. Sensibilidade essa, relatada por Graham et al. (1992); Rengel & Graham, (1996) e Cakmak et al. (1997). Mesmo com teores acima do nível crítico as seguintes condições podem induzir carência temporária de Zn: pH alcalino, textura muito argilosa, altos níveis de P no solo e práticas culturais relacionadas a disponibilidade hídrica. Tais fatores podem ocasionar menor disponibilidade de Zn no solo, caracterizando assim, fator limitante para o desenvolvimento, expressão do potencial produtivo das culturas e qualidade nutricional dos grãos. No entanto, faz-se necessário mais estudos para esclarecimentos quanto a resposta de cultivares de trigo ao Zn mesmo em solos com teores acima do nível crítico, para maior segurança na recomendação de adubação.

Quando avaliou-se os resultados entre os cultivares, foram observadas diferenças para afilhamento e produtividade em 2012 e apenas para produtividade em 2013. De forma geral, o afilhamento foi maior para o cultivar BRS Guamirim quando comparado ao cultivar CD 150. Por outro lado, em relação a produtividade, o cultivar CD 150 apresentou maiores rendimentos quando comparado ao cultivar BRS Guamirim (Tabela 7). Comportamento esses que corroboram com os resultados obtidos em Palotina, notando similaridade de desenvolvimento das cultivares avaliada entre os ambientes de cultivo, apesar das diferenças climáticas.

Tabela 7. Influência dos métodos de aplicação de zinco no afilhamento, biomassa, produtividade e massa de 1000 grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Cascavel, ano 2012 e 2013.

Cultivar	2012				2013			
	Controle[(1)]	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F	Controle	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F
				Afilhamento (n^0/planta)				
CD 150	4,6 a B[(2)]	4,3 a A	4,7 a B	4,5 a A	4,2 a A	3,9 a A	4,3 a A	3,6 a A
BRS Guamirim	5,0 a A	4,7 a A	5,3 a A	4,8 a A	4,7 a A	4,2 a A	4,6 a A	4,0 a A
				Biomassa (g/20 plantas)				
CD 150	54,2 a A	52,9 a A	51,0 a A	54,1 a A	54,0 a A	48,5 a A	50,5 a A	48,0 a A
BRS Guamirim	54,1 a A	49,7 a A	51,7 a A	49,6 a A	46,0 a A	52,5 a A	47,0 a A	51,5 a A
				Produtividade (kg ha^{-1})				
CD 150	3015 a A	2943 a A	3074 a A	3051 a A	2950 b A	2921 b A	3191 a A	3250 a A
BRS Guamirim	2882 a A	2836 a A	2883 a B	2838 a B	2789 a A	2769 a A	2890 a B	2983 a A
				Massa de 1000 grãos (g)				
CD 150	45,4 a A	45,3 a A	45,5 a A	45,1 a A	40,2 a A	39,6 a A	40,3 a A	40,4 a A
BRS Guamirim	44,7 a A	45,3 a A	45,4 a A	44,0 a A	39,0 a A	40,1 a A	39,1 a A	39,1 a A

[(1)] Métodos de aplicação: Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar). [(2)]Teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade, médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal (entre tratamentos da mesma cultivar) e maiúscula na vertical (entre cultivares).

3.2.3 QUALIDADE NUTRICIONAL DOS GRÃOS

No ano 2012, avaliando-se os resultados entre tratamentos individualmente para cada cultivar, observou-se diferença estatística para concentração de Zn no cultivar BRS Guamirim. Para o ano 2013 os resultados foram mais expressivos, houve diferença estatística para concentração de Fe no cultivar CD 150 e concentração de Zn e proteína no cultivar BRS Guamirim (Tabela 8). Nota-se que as maiores concentrações de Zn no ano 2012 foram encontradas nos tratamentos Zn-F (33,7 mg kg^{-1}) e Zn-S+F (36,8 mg kg^{-1}), correspondendo à 15% e 25% superiores ao obtido para o tratamento controle (29,4 mg kg^{-1}).

Para 2013, houve diferença na concentração de Fe no cultivar CD 150, sendo o tratamento que proporcionou maior concentração Zn-F (63,7 mg kg^{-1}), correspondendo a 16% superior ao tratamento controle (54,9 mg kg^{-1}). No mesmo ano, observou-se diferença para concentração de Zn e proteína no cultivar BRS Guamirim. As maiores concentrações de Zn foram: Zn-F (63,7 mg kg^{-1}) e Zn-S+F (73,0 mg kg^{-1}), caracterizando aumentos de 30% e 48% superiores ao tratamento controle (49,2 mg kg^{-1}). Quanto ao teor de proteína, destacaram-se os tratamentos Zn-S (26,2%) e Zn-F (25,3%), correspondendo a aumentos de 20% e 16% em relação ao tratamento controle (21,9%) (Tabela 8).

Em geral, houve aumento significativo de Fe e proteína nos grãos tanto em Palotina quanto em Cascavel, refletindo a adubação com Zn realizada. Os resultados sugerem uma relação positiva entre Zn, Fe e proteína, pois aumentando a concentração de Zn nos grãos, observou-se proporcional incremento em Fe e proteína. Corroborando com os resultados anteriores, na qual, nota-se que o tratamento que proporcionou a maior concentração de Zn (Zn-S+F), também foi o que apresentou a maior concentração de Fe e proteína. Como exceção cita-se o ano de 2013, onde, as concentrações de Fe e proteína foram maiores no tratamento Zn-F.

O aumento simultâneo de Zn e Fe indica que esses dois metais sejam transportados para os grãos através dos mesmos mecanismos, uma vez que existem transportadores de Fe que são capazes de transportar Zn (Guerinot, 2000; Schaaf et al. 2005). Como exemplo, pode-se citar o citrato, que já foi relatado como carregador natural de ferro (Ferrandon & Chamel, 1988; Abadia et al., 2002) e carregador de Zn (White et al., 1981), em determinadas espécies vegetais.

A relação positiva entre Zn e Fe é de suma importância para biofortificação, uma vez que a adubação com Fe não influência na concentração do elemento no grão (Gupta, 1991). Ausência de resposta da adubação com Fe, pode estar associada á rápida conversão do elemento em formas indisponíveis quando aplicado no solo e/ou baixa mobilidade no floema e, consequentemente sendo menos eficaz que o Zn na translocação para os grãos (Rengel et al., 1999; Cakmak, 2008). O aumento da concentração de Zn, além de proporcionar benefícios à nutrição e saúde humana, é de grande importância para germinação, vigor e melhor desenvolvimento inicial de plantas em condições de estresse biótico e abiótico (Rengel & Graham, 1995; Yilmaz et al., 1997; Welch, 1999b; Boaretto & Moraes, 2010).

Resultados semelhantes, porém em ambientes com características distintas, foram obtidos em trigo cultivado em solos deficientes em Zn na Anatólia Central, Turquia (Cakmak et al., 1996). Os autores observaram que a aplicação de sulfato de zinco ($ZnSO_4$) no solo, aumentou a concentração de Zn em grãos de trigo. Aumentos similares em relação às concentrações de Zn nos grãos também foram obtidos na Austrália (Graham et al., 1992) e Índia (Shiway et al., 2008), com aplicação de Zn em solos originalmente deficientes nesse micronutriente. É importante destacar que no presente estudo, mesmo em solos com alta disponibilidade de Zn, observou-se aumentos na concentração de Zn nos grãos. Desta forma, mesmo em condições com alta disponibilidade de Zn, existe possibilidade de resposta ao elemento tanto na produtividade (Tabelas 3 e 7), quanto na concentracão de Zn nos grãos (Tabelas 4 e 8).

Comparando-se os resultados entre cultivares, verifica-se diferença para concentração de Zn e Fe em 2012, e diferença para concentração de Zn, Fe e proteína em 2013 (Tabela 8). Verifica-se de forma geral e em ambos os anos, maiores concentrações de Zn, Fe e proteína foram do cultivar BRS Guamirim.

Tabela 8. Influência dos métodos de aplicação de zinco na concentração de Zn, Fe e proteína nos grãos em cultivares de trigo (média de quatro repetições). Cascavel, ano 2012 e 2013.

Cultivar	2012				2013			
	Controle[(1)]	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F	Controle	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F
				Concentração de Zn (mg kg^{-1})				
CD 150	26,1 a A[(2)]	27,7 a A	28,8 a B	30,7 a B	33,8 a A	38,7 a A	57,7 a A	46,9 a B
BRS Guamirim	29,4 b A	29,9 b A	33,7 a A	36,8 a A	49,2 b A	44,3 b A	66,8 a A	73,0 a A
				Concentração de Fe (mg kg^{-1})				
CD 150	52,2 a B	52,8 a B	52,1 a B	53,2 a B	54,9 b B	57,9 b A	63,7 a A	55,1 b B
BRS Guamirim	58,2 a A	58,5 a A	58,9 a A	59,9 a A	65,9 a A	59,4 a A	70,9 a A	62,6 a A
				Proteína (%)				
CD 150	17,4 a A	17,6 a A	16,9 a A	17,9 a A	19,3 a A	21,8 a B	24,5 a A	21,3 a A
BRS Guamirim	17,8 a A	17,3 a A	18,3 a A	18,5 a A	21,9 b A	26,2 a A	25,3 a A	21,8 b A

[(1)]Métodos de aplicação: Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar). [(2)]Teste de Scott-Knott ao nível de 5% de probabilidade, médias seguidas pela mesma letra minúscula na horizontal (entre tratamentos da mesma cultivar) e maiúscula na vertical (entre cultivares).

3.2.4 ANÁLISE MULTIVARIADA DOS RESULTADOS

A análise conjunta dos dados (Figuras 4(a) e 4(b)) revelou comportamento similares entre anos e ambientes de cultivo. De forma geral, o cultivar CD 150 relacionou-se com as maiores produtividade e o cultivar BRS Guamirim apresentou maior número de afilho e concentrações de Zn, Fe e proteína nos grãos. Por meio dos resultados, pode-se aventar que houve comportamento inversamente proporcional entre produtividade e as demais variáveis, como: afilho e concentrações de nutrientes e proteínas nos grãos. Por outro lado, houve comportamento diretamente proporcional entre concentrações de nutrientes e proteínas.

Utilizando uma matriz de correlações de Pearson, é possível verificar o quanto essas variáveis estão correlacionando entre si (Tabela 9). Pode se observar no ano de 2012, a existência de correlação negativa e significativa entre: produtividade e concentração de Fe (-0,45%) e produtividade e proteína (-0,44%). Verificou-se também correlação positiva e significativa entre: afilho e concentração de Fe (0,40%); concentração de Zn e concentração de Fe (0,34%); concentração de Zn e proteína (0,37%) e concentração de Fe e proteína (0,34%). Para o ano de 2013, observou-se correlações positivas e significativas entre: afilho e concentração de Fe (0,43%) e concentração de Zn e concentração de Fe (0,47%). Conforme resultados da análise multivariada e correlação de Pearson entre as variáveis respostas, nota-se comportamentos semelhantes entre Palotina e Cascavel.

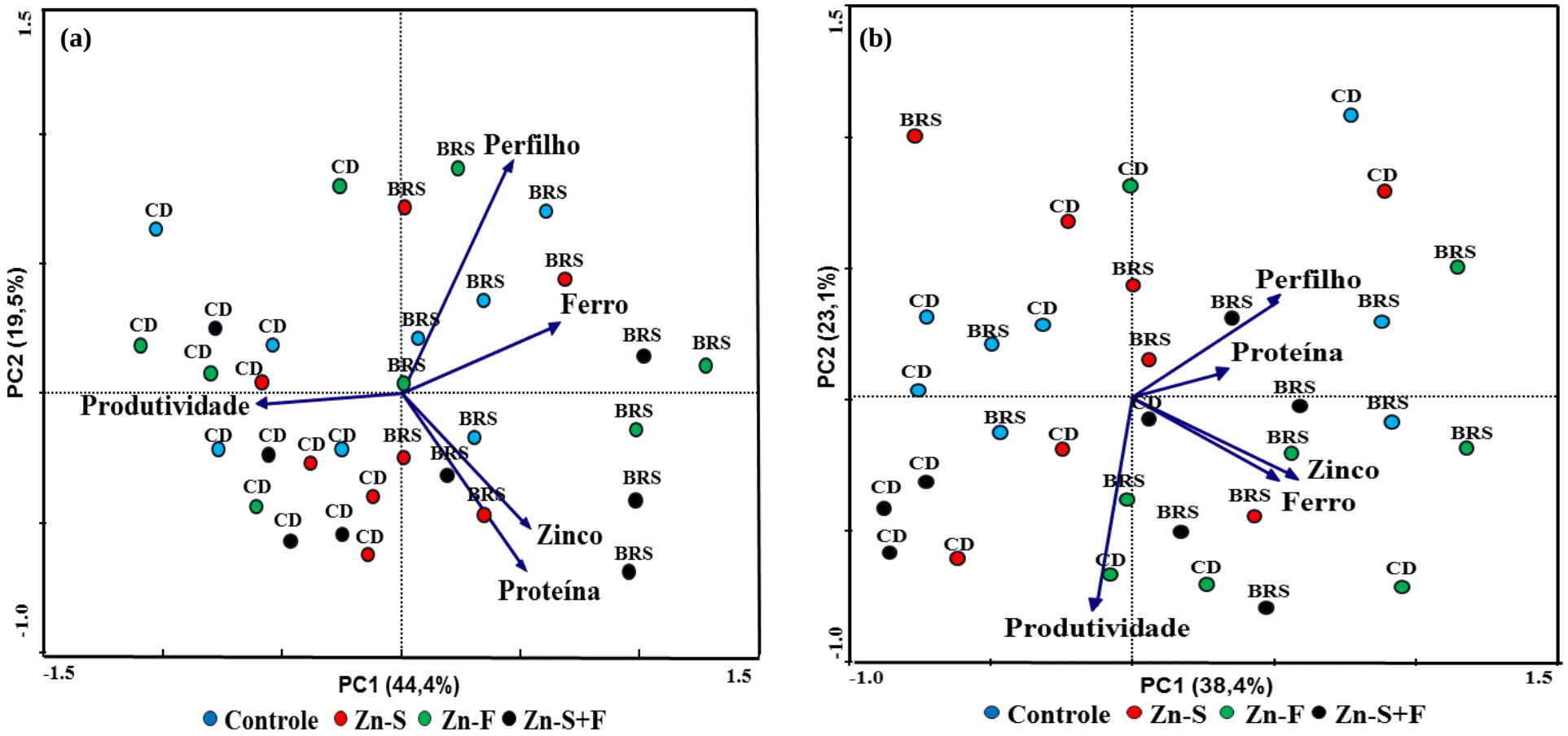


Figura 4: Análise de componentes principais dos cultivares de trigo CD 150 (CD) e BRS Guamirim (BRS), Cascavel, ano 2012 (a) e 2013 (b), em função dos métodos de aplicação: Controle (Sem aplicação) Zn-S (Zinco aplicado no solo); Zn-F (Zinco aplicado via foliar) e Zn-S+F (Zinco aplicado no solo e via foliar).

Tabela 9. Correlação de Pearson entre produtividade, afilhamento, concentração de Zn, Fe e proteína em trigo, cultivados em Cascavel, ano 2012 e 2013.

Variável	Produtividade	Afilhamento	Conc. Zn	Conc. Fe	Proteína
			2012		
Produtividade	1,00 (1)				
Afilhamento	-0,29^{ns}	1,00			
Conc. Zn	-0,18^{ns}	0,17^{ns}	1,00		
Conc. Fe	-0,45***	0,40**	0,34*	1,00	
Proteína	-0,44**	0,11^{ns}	0,37**	0,34*	1,00
			2013		
Produtividade	1,00				
Afilhamento	-0,27^{ns}	1,00			
Conc. Zn	-0,02^{ns}	0,25^{ns}	1,00		
Conc. Fe	-0,09^{ns}	0,43**	0,47***	1,00	
Proteína	-0,02^{ns}	0,27^{ns}	0,03^{ns}	0,18^{ns}	1,00

(1) ***, **, *, ^{ns}, significativo ao teste de correlação de Pearson a 1%, 5%, 10% de probabilidade e não significativo, respectivamente.

3.3 COMPARAÇÕES ENTRE AMBIENTES DE PRODUÇÃO

Apesar da proximidade entre os locais de cultivo, os solos, altitude e tratos culturais adotados são bastante diferentes, provocando perceptível variação na magnitude de resposta das plantas entre os ambientes. Tal fato, pode ser melhor evidenciado nas Figuras 5(a) e 5(b), nas quais observa-se maiores concentrações de Zn em Palotina e a maiores produtividades em Cascavel, independentemente dos cultivares e tratamentos adotados. Nesse contexto, Gomez-Becerra et al. (2010b); Karami et al. (2009) e Morgounov et al. (2007), relatam que a concentração de Zn nos grãos de determinado genótipo, varia grandemente quando cultivado em locais diferentes. Segundo Joshi et al. (2010) e Zhang et al. (2010b), as concentrações de Zn nos grãos de trigo variam, em grande parte, devido a interação genótipo e ambiente. Os resultados permitem inferir que os fatores que favorecem os maiores rendimentos não são os mesmos que contribuem paras as maiores concentrações de nutrientes nos grãos, conforme observado no presente trabalho ao avaliar a influência do ambiente na produtividade e concentração de Zn nos grãos de trigo.

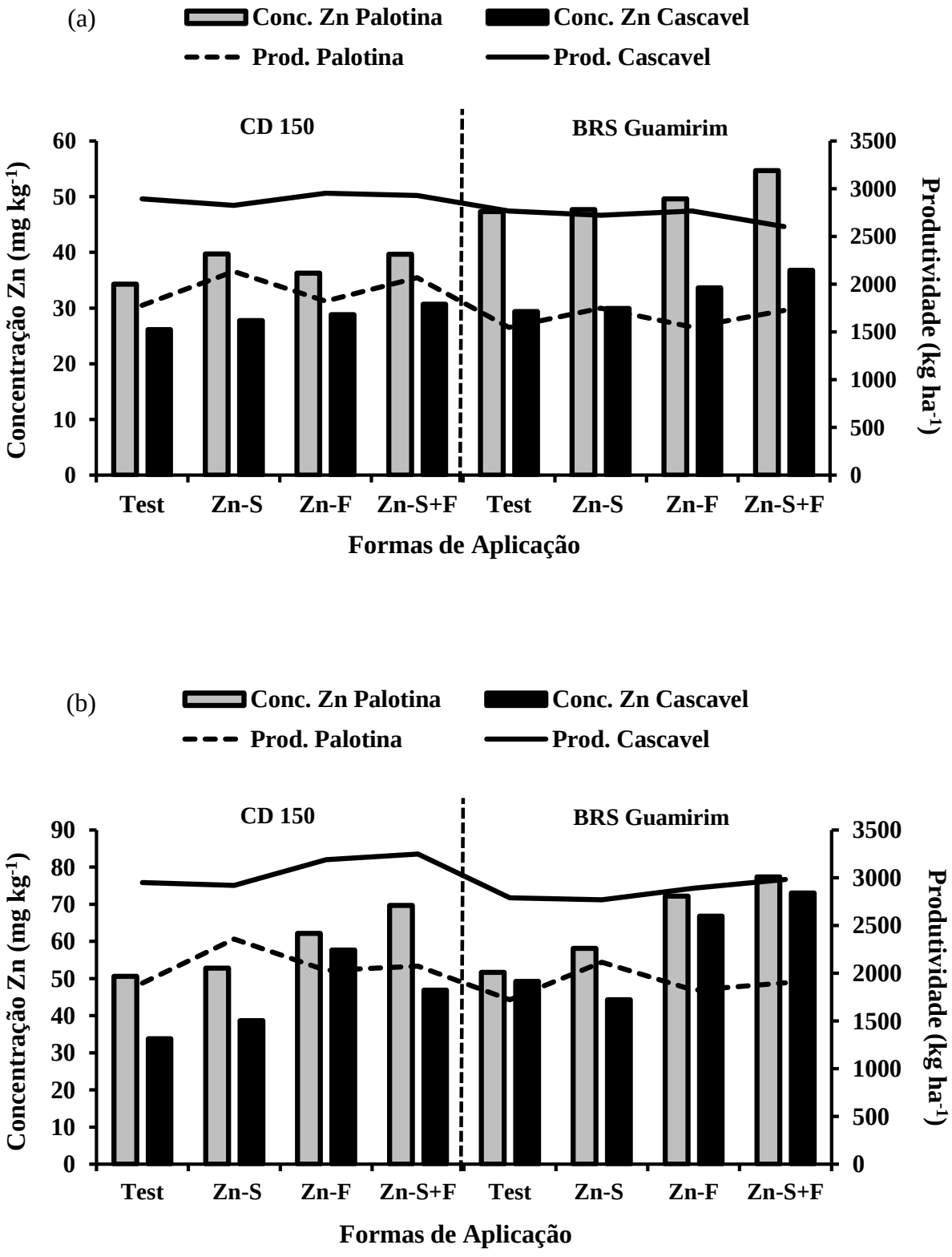


Figura 5: Influência do ambiente (Palotina e Cascavel) e da forma de aplicação de Zn nas suas concentrações nos grãos e na produtividade de cultivares de trigo. Ano 2012 (a) e 2013 (b). Test: Testemunha; Zn-S: Zn aplicado no solo; Zn-F: Zn aplicado via foliar e Zn-S+F: Zn aplicado no solo e via foliar.

Embora a magnitude das respostas tenham sido diferente entre os ambientes de cultivo, ou seja, Palotina e Cascavel são visíveis à semelhança de comportamento para as variáveis analisadas: produtividade e concentração de Zn nos grãos em dois anos consecutivos de cultivo, 2012 e 2013 (Figuras 5(a) e 5(b)), respectivamente. Houve grande consistência nos resultados, pois mesmo em condições distintas de ambientes, a concentração de Zn foi maior em todos os tratamentos para o cultivar BRS Guamirim e, por outro lado, os maiores rendimentos foram sempre obtidos com o cultivar CD 150, independente do ambiente.

Nesse contexto, comparando-se os resultados obtidos com a concentração alvo de Zn em grãos de trigo, estipulada pelo Programa HarvestPlus de biofortificação (41 mg kg^{-1}), pode-se notar diferenças marcantes. Para o ano 2012 em Palotina, o cultivar CD 150 não atingiu a concentração alvo, no entanto, os tratamentos Zn-S e Zn-S+F proporcionaram aumentos que chegaram próximo à concentração alvo. Todavia, o cultivar BRS Guamirim apresentou concentrações de Zn superiores à concentração alvo em todos os tratamentos (Figura 6(a)). Para o ano 2013, ambos os cultivares obtiveram concentrações superiores à concentração alvo em todos os tratamentos (Figura 6(b)). Em Cascavel, no ano 2012, nenhuma cultivar alcançou a concentração alvo, porém, o tratamento Zn-S+F foi mais eficiente e proporcionou aumentos que chegaram próximo a concentração alvo (Figura 6(c)). Para o ano de 2013 em Cascavel, o cultivar CD 150 superou a concentração alvo apenas nos tratamentos Zn-F e Zn-S+F, enquanto o cultivar BRS Guamirim superou a concentração alvo em todos os tratamentos (Figura 6(d)).

Em geral, as concentrações de Zn nos grãos de cultivares de trigo comerciais variam entre 20 e 35 mg kg^{-1} (Rengel et al., 1999; Cakmak et al., 2004). Tais concentrações de Zn nos grãos são consideradas insuficientes para suprir as exigências diárias do nutriente na dieta humana (Pfeiffer e McClafferty, 2007b; Cakmak, 2008). Sendo esta uma das causas do elevado número de deficiência nutricional em humanos relatados na literatura, pois o Zn é um dos princípais elementos causadores de diversos distúrbios fisiológicos e metabólicos no organismo humano. Os resultados do presente trabalho comprovam que a integração de pontencial genético e manejo da aplicação de Zn, ou seja, associação entre biofortificação getética e agronômica, torna possivel a obtenção de concentrações alvos de forma consistente, independente de variações ambienetais. Como exemplo, pode-se observar que o cultivar BRS Guamirim apresentou concentrações superiores à concentração alvo em todos os locais e ano, a exceção de 2012 em Cascavel, nos quais as concentrações foram menores, embora o tratamento Zn-S+F tenha obtido valor muito próximo à concentração alvo.

Os resultados demonstram que em curto espaço de tempo pode haver grandes modificações nas concentrações de Zn nos grãos. Tais mudanças são devidas as alterações climáticas, principalmente precipitação e temperatura, fatores esses relacionados às atividades fisiológicas e de desenvolvimento das plantas. Confirmando o pressuposto, observa-se nas Figura 2(a) e 2(b), a precipitação relativa ao período de cultivo dos experimentos, no qual em Palotina choveu 325,8 mm em 2012 e 751,9 mm em 2013. Em Cascavel, choveu 351,3 mm em 2012 e 772,7 mm em 2013. Observa-se que as maiores concentrações de Zn nos grãos em Palotina e Cascavel foram obtidas em 2013 (Figura 6(b) e 6(d)), mesmo ano em que houve maior precipitação em ambos os ambientes, sendo o dobro do observado para o ano de 2012. Desta forma, caracteriza-se a forte influência do ambiente na qualidade nutricional dos grãos.

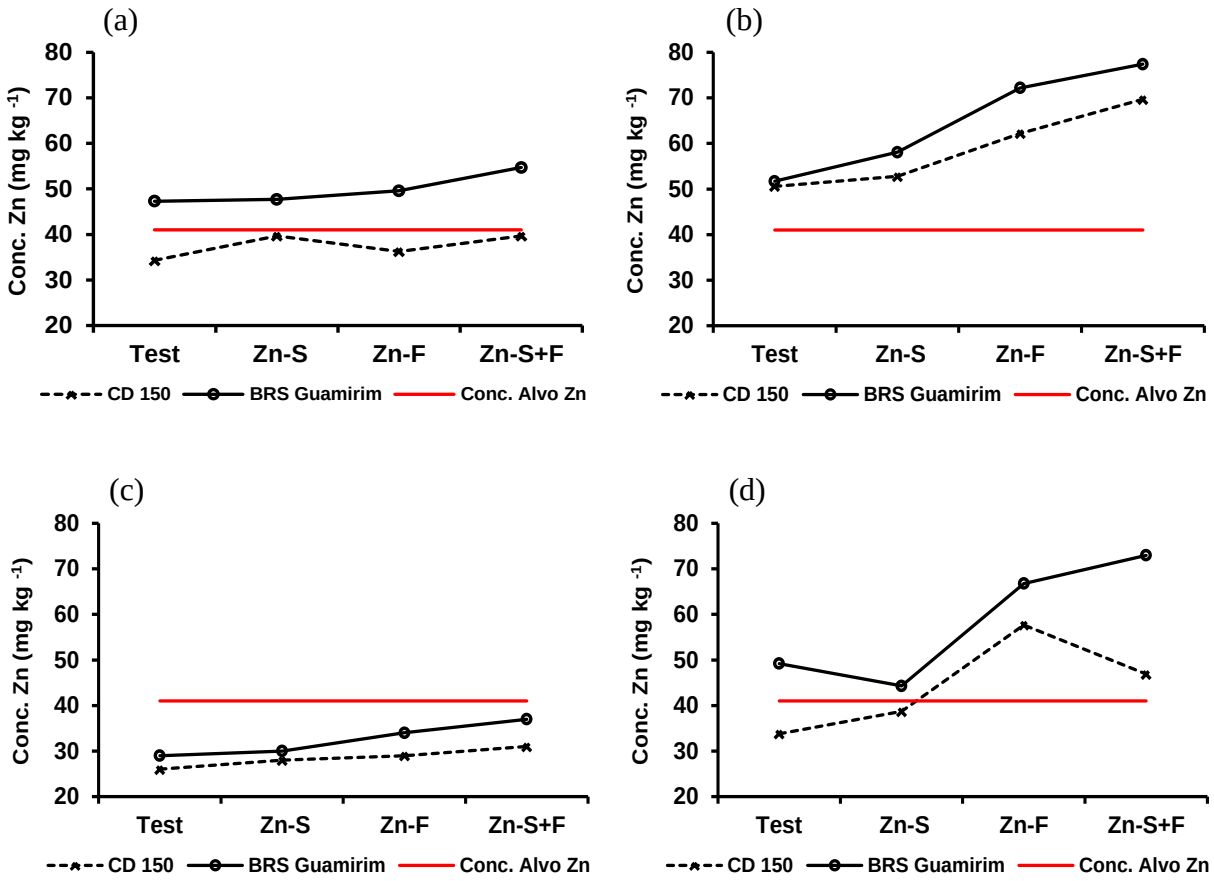


Figura 6: Comparação entre concentrações de Zn obtidas variando-se as formas de aplicação do elemento, com teores alvo de Zn para a cultura do trigo proposto pelo Programa HarvestPlus de Biofortificação, em Palotina 2012 (a) e 2013 (b) e Cascavel 2012 (c) e 2013 (d).

O ambiente de produção exerceu notório influência na produtividade e, por conseguinte, também afetou a concentração de Zn nos grãos de trigo. Desta forma, ao analisar os dados

médios de cada local, ficou evidente que as maiores produtividades foram obtidas em Cascavel e, por outro lado, as maiores concentrações de Zn nos grãos aconteceram em Palotina (Tabelas 11 e 12). No entanto, ao calcular o total de Zn acumulado nos grãos, verifica-se que em ambas as cultivares, nos dois anos, ocorreu maior acumulo no ambiente de Cascavel.

De forma geral, é possível inferir que quando há alta produtividade, geralmente a concentração de nutrientes decresce, ocorrendo o que se conhece na literatura como "Efeito de Diluição". Em outras palavras, o ganho em carboidratos é maior que a acumulação de nutrientes nos grãos. Esses resultados evidenciam a necessidade da definição de uma metodologia para identificação de plantas eficientes na acumulação de nutrientes na parte comestível, uma vez que a concentração é bastante variável em razão de mudanças no ambiente, podendo levar a seleções errôneas.

O efeito de diluição tem sido relatado por diversos autores em estudos sobre biofortificação (Garvin et al., 2006; Fan et al., 2008). Esses autores tem sustentado a hipótese de uma diluição de micronutrientes em grãos de cultivares de trigo ao longo do tempo, com a evolução no melhoramento visando apenas altas produtividades. Evidência que comprova essa tendência, baseia-se na estreita variação genética para micronutrientes, em cultivares modernos de trigo. Segundo Ortiz-Monasterio & Graham (2000) e Cakmak (2002), a concentração média de Zn em cultivares de trigo moderno é inferior a observada nos grãos de trigo selvagem e primitivo. Com base nos resultados obtidos no presente trabalho, é possivel afirmar que cultivares modernos, voltados para maiores rendimentos, geralmente concentram menos nutrientes nos grãos. Todavia, podem apresentar maior acúmulo de nutrientes dependendo das condições de fertilidade do solo, tratos culturais, cultivares e variações no ambiente de cultivo.

Enfim, o notório efeito de diluição dos nutrientes devido ao maior ganho de carboidratos na biomassa de grãos, faz com que a população não consiga ingerir quantidade suficiente de nutrientes, basando-se nas dietas tradicionais. Desta forma, para não haver deficiência nutricional, há necessidade de se aumentar a ingestão, porém, o excesso de carboidratos poderá levar a problemas de obesidade. A biofortificação apresenta-se como alternativa mais viável, porém os cultivares modernos com características de biofortificação demandam unir potencial produtivo e maior concentração de nutrientes nas partes comestíveis.

Tabela 10: Somatório das médias de todos os tratamentos com aplicação do Zn, em relação à produtividade, concentração e acúmulo de Zn nos grãos, em distintos ambientes. Ano 2012.

Ambiente	Cultivares					
	CD 150			BRS Guamirim		
	Produtividade kg ha^{-1}	Concentração mg kg^{-1}	Acúmulo g ha^{-1}	Produtividade kg ha^{-1}	Concentração mg kg^{-1}	Acúmulo g ha^{-1}
Palotina	2032,1 b	37,5 a	76,5 b	1711,9 b	49,7 a	85,1 b
Cascavel	3020,9 a	28,3 b	85,7 a	2859,7 a	32,4 b	92,7 a

(1) Médias seguidas pela mesma letra na vertical (entre ambientes) não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

Tabela 11: Somatório das médias de todos os tratamentos com aplicação do Zn, em relação à produtividade, concentração e acúmulo de Zn nos grãos, em distintos ambientes. Ano 2013.

Ambiente	Cultivares					
	CD 150			BRS Guamirim		
	Produtividade kg ha^{-1}	Concentração mg kg^{-1}	Acúmulo g ha^{-1}	Produtividade kg ha^{-1}	Concentração mg kg^{-1}	Acúmulo g ha^{-1}
Palotina	2089,7 b	58,8 a	122,7 a	1890,8 b	64,8 a	122,6 b
Cascavel	3077,8 a	44,3 b	137,3 a	2857,6 a	58,3 a	167,7 a

(1) Médias seguidas pela mesma letra na vertical (entre ambientes) não diferem estatisticamente a 5% de probabilidade, pelo teste de Scott-Knott.

3.4 RELAÇÃO CUSTO/BENEFÍCIO DA APLICAÇÃO DE ZN

Referente ao aspecto econômico, os cultivares CD 150 e BRS Guamirim apresentaram relação custo/benefício variável dependendo dos tratamentos (Zn-S, Zn-F e Zn-S+F). Para o cultivar CD 150, a cada real investido, o retorno variou de + 2,90 a - 1,47 R$/ha e para o cultivar BRS Guamirim, o retorno variou de + 0,92 a -1,30 R$/ha (Tabela 12).

Variações negativas poderiam ser diminuídas em condições de deficiência de Zn, uma vez que a resposta à aplicação do elemento seria maior, refletindo em maiores excedentes produtivos e alcançando assim o ponto de equilíbrio. No presente trabalho, a produtividade de grãos para atingir o ponto de equilíbrio seria: 152 kg ha^{-1}, 62 kg ha^{-1} e 214 kg ha^{-1}, para cobrir os gastos com as aplicações Zn-S, Zn-F e Zn-S+F, respectivamente (Tabela 12). É importante destacar, que condições de deficiência no solo são comuns em países em desenvolvimento, como: Índia e África, nos quais verifica-se os maiores índice de deficiência nutricional (Graham et al., 2001). Nestas condições há maior viabilidade imediata da prática de adubação visando a biofortificação, resultando em maiores rendimentos e maiores concentrações de nutrientes nos grãos. Nas condições de cultivo do Brasil, geralmente os solos apresentam-se com fertilidade construída e, desta forma, a aplicação de Zn normalmente não aumentará a produtividade (Tabelas 3 e 7), fazendo apenas aumentar a concentração de Zn nos grãos (Tabelas 4 e 8).

Nesse contexto, outras intervenções poderiam ser utilizadas para tornar a prática de adubação com micronutrientes um dos focos para qualidade nutricional dos produtos. Pode-se citar algumas medidas: 1) Melhoramento genético vegetal voltado para obtenção de cultivares responsivos a adubação e que conciliam altos rendimentos e concentração de nutrientes nos grãos; 2) Incentivos governamentais, com políticas de subsídios para produtos alimentícios de melhor qualidade nutricional, colaborando assim para maior utilização de cultivares biofortificados; 3) Participação da indústria do trigo, premiando/pagando mais por grãos com melhor qualidade nutricional.

Tabela 12: Relação custo/benefício das formas de aplicação de Zn, considerando o excedente produzido em Palotina e Cascavel, em dois anos consecutivos de cultivo.

Excedente produzido[(1)]	CD 150			BRS Guamirim		
	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F	Zn-S	Zn-F	Zn-S+F
	---------- kg ha^{-1}----------			---------- kg ha^{-1}----------		
Palotina 2012	+ 368	+ 44	+ 301	+ 211	+ 3	+ 186
Palotina 2013	+ 460	+ 132	+ 179	+ 294	+ 101	+ 177
Cascavel 2012	- 72	+ 59	+ 36	- 46	+ 1	- 44
Cascavel 2013	- 29	+ 241	+ 300	- 20	+ 101	+ 194
Custo/Benefício[(2)]	----------R$ ha^{-1}----------			----------R$ ha^{-1}----------		
Palotina 2012	+ 1,40	- 0,29	+ 0,41	+ 0,38	- 0,95	- 0,14
Palotina 2013	+ 2,00	+ 1,14	- 0,16	+ 0,92	+ 0,65	- 0,18
Cascavel 2012	- 1,47	- 0,04	- 0,83	- 1,30	- 0,98	- 1,20
Cascavel 2013	- 1,19	+ 2,90	+ 0,40	- 1,13	+ 0,65	- 0,09
	---------- kg ha^{-1}----------			---------- kg ha^{-1}----------		
Ponto de Equilíbrio[(3)]	152	62	214	152	62	214

[(1)] Excedente produzido: Acréscimo (+) ou decréscimo (-) da produtividade proporcionado pelas formas de aplicação de Zn (Zn-S, Zn-F e Zn-S+F), comparado ao tratamento controle. [(2)] Custo/benefício: Relação entre a receita bruta do excedente produzido (considerou-se a saca de 60 kg de trigo, cotada a R$ 41,39) e o custo com aplicação de Zn por hectare: Zn-S (R$ 105,54), Zn-F (R$ 42,53) e Zn-S+F (R$ 148,07), valores obtidos junto às empresas da região. [(3)] Ponto de Equilíbrio: Multiplicação entre o Excedente produzido e o Custo com aplicação do Zn, dividido pela Receita bruta.

4. CONCLUSÕES

A aplicação de Zn em solos de fertilidade construída influencia no estado nutricional das plantas de trigo, aumentando a concentração de Zn nas folhas e nos grãos. Ocorrem poucas mudanças no estado nutricional e teores nos grãos em relação aos demais nutrientes;

Em solos com teores de Zn acima do nível crítico, a aplicação de Zn tem pouca influência na produtividade. Por outro lado, variações nos ambientes de cultivo e manejo causam maiores alterações na produtividade do trigo;

O método de aplicação de Zn no solo conciliado com a aplicação foliar (Zn-S+F) é mais efetivo no aumento das concentrações de Zn nos grãos;

Há relação inversa entre produtividade e concentração de Zn nos grãos e, nas condições estudadas, o cultivar comercial associou-se aos maiores rendimentos, enquanto o cultivar com potencial para biofortificação apresenta maior concentração de Zn nos grãos;

A concentração de Zn nos grãos correlaciona-se positivamente com número de afilho, concentrações de Fe e proteína nos grãos;

Características do ambiente de produção determinam a expressão do potencial produtivo e, consequentemente, também afetam a concentração de Zn nos grãos. Os cultivares comerciais sofrem maiores alterações nas concentrações de Zn nos grãos em relação a um cultivar com potencial para biofortificação;

A seleção de um cultivar com potencial para biofortificação e que apresenta bom potencial produtivo, quando associada estratégias de aplicação de Zn, se mostrou a melhor opção para biofortificação agronômica do trigo.

5. AGRADECIMENTO AOS APOIADORES

Cooperativa Central de Pesquisa Agrícola (COODETEC), pela disponibilização da área experimental, equipamentos, mão de obra e sementes;

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

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de PIBIC associadas a essa pesquisa;

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Trigo), pelo fornecimento de sementes;

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA Soja), pela realização das análises;

Programa Embrapa HarvestPlus de Biofortificação, pelas informações sobre cultivares com potencial para biofortificação e custeio parcial do projeto;

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPG Ciência do solo) da Universidade Federal do Paraná, pelo espaço cedido;

Universidade de Sabanci e Programa HarvestZinc, pelo apoio financeiro parcial.

6. LITERATURA CITADA

ABADÍA, J.; LÓPEZ-MILLÁN, A.F.; ROMBOLÁ, A.; ABADÍA, A. Organic acids and deficiency: a review. Plant Soil, 241:75-86, 2002.

BÄNZIGER, M.; LONG, J. The potential for increasing the iron and zinc density of maize through plant-breeding. Food Nutr. Bull. 21:397-400, 2000.

BATAGLIA, O.C. Análise química da planta. In: FERREIRA E. & CRUZ, M. C. P. Micronutrientes na agricultura. Simpósio sobre micronutrientes na agricultura. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e Fosfato, 1991. p.289-305.

BOARETTO, A.E.; MORAES, M.F. Contribuição da nutrição adequada para qualidade dos alimentos. II Simpósio Paulista sobre Nutrição de Plantas Aplicada em Sistemas de Alta Produtividade: Diagnose Foliar em Hortaliças, Jaboticabal, 2010. p.09-44.

BOUIS, H.E. Economics of enhanced micronutrient density in food staples. Field Crops Res., 60:165-173, 1999.

BOUIS, H.E.; CHASSY, B.M.; OCHANDA, O. Genetically modified food crops and their contribution to human nutrition and food quality. Trends in Food Science and Technology, 14:191-209, 2003.

BREMNER, J.M.; EDWARDS, H.L. Determination and isotope ratio analysis of differents forms of nitrogen in soils. I. Aparatus and procedures for destillation and determination for ammonium. Soil Science Society of America Proceedings, 29:504-507, 1965.

CALDERINI, D.F.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. Crop Sci., 43:141-151, 2003.

CAKMAK, I.; YILMAZ, A.; EKIZ, H.; TORUN, B.; ERENOGLU, B.; BRAUN, H.J. Zinc deficiency as a critical nutritional problem in wheat production in Central Anatolia. Plant Soil 180:165-172, 1996.

CAKMAK, I.; EKIZ, H.; YILMAZ, A.; TORUN, B.; KOLELI, N.; GULTEKIN, I.; ALKAN, A.; EKER, S. Differential response of rye, triticale, bread and durum wheat to zinc deficiency in calcareous soils. Plant Soil 188:1-10, 1997.

CAKMAK, I. Plant nutrition research: priorities to meet human needs for food in sustainable ways. Plant Soil, 247:3-24, 2002.

CAKMAK, I.; TORUN, A.; MILLET, E.; FELDMAN, M.; FAHIMA, T.; KOROL, A.; NEVO, E.; BRAUN, H.J.; OZKAN, H. *Triticum dicoccoides*: An important genetic resource for increasing zinc and iron concentration in modern cultivated wheat. Soil Sci. Plant Nutr., 50:1047-1054, 2004.

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

Cakmak, I. et al. Biofortification and Localization of Zinc in Wheat Grain. J. Agric. Food Chem. 58 (16):9092-9102, 2010.

CAKMAK, I.; PFEIFFER, W.H.; MCCLAFFERTY, B. Biofortification of Durum Wheat with Zinc and Iron. Cereal chemistry, 87(1):10-20, 2010a.

CAKMAK, I.; KALAYCI, M.; KAYA, Y.; TORUN, A.A.; AYDIN, N.; WANG, Y.; ARISOY, Z.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; GOKMEN, O.; OZTURK, L.; HORST, W.J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. J Agric Food Chem 58:9092-9102, 2010b.

CALDERINI, D.F.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. Crop Sci 43:141-151, 2003.

CAYTON, M.T.C.; REYES, E.D.; NEUE, H.U. Effect of zinc fertilization on the mineral nutrition of rices differing in tolerance to zinc deficiency. Plant and Soil, 87:882-885, 1985.

COSTA, J.M.; OLIVEIRA, E.F. Fertilidade do solo e nutrição de plantas. Cascavel: COAMO/COODETEC, 2001. 93p.

CHAVAN, J.K.; KADAM, S.S. Nutritional Improvement of cereals. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 28(5):401-437, 1989.

DEMMENT, W.M.; YOUNG, M.M.; SENSENIG, R.L. Providing micronutrients through food-based solutions: a key to human and national development. J. Nutr., 133:3879-3885, 2003.

DISTELFELD, A.; CAKMAK, I.; PELEG, Z.; OZTURK, L.; YAZICI, A.M.; BUDAK, H.; SARANGA, Y.; FAHIMA, T. Multiple QTL-effects of wheat Gpc-B1 locus on grain protein and micronutrient concentrations. Physiol Plant, 129:635-643, 2007.

EKIZ, H.; BAGCI, S.A.; KIRAL, A.S.; EKER, S.; GULTEKIN, I.; ALKAN, A.; CAKMAK, I. Effects of zinc fertilization and irrigation on grain yield and zinc concentration of various cereals grown in zinc-deficient calcareous soil. Journal of Plant Nutrition, v. 21, p. 2245-2256, 1998.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Sistema brasileiro de classificação de solos. 2ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.

EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed., Brasília, Embrapa Informações Tecnológicas, 2009. 627p.

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Growth components and zinc recovery efficiency of upland rice genotypes. Pesq. agropec. bras. Brasília, 40 (12):1211-1215, 2005.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED ATIONS. FAOSTAT. 2012. Disponível em <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>acesso em: 15 de maio 2012.

FAN, M.S.; ZHAO, F.J.; FAIRWEATHER-TAIT, S.J.; POULTON, P.R.; DUNHAM, S.J.; MCGRATH, S.P. Evidence of decreasing mineral density in wheat grain over the last 160 years. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 22:315-324, 2008.

FEIL, B.; FOSSATI, D. Mineral composition of triticale grains as related to grain yield and grain protein. Crop Sci. 35:1426-1431, 1995.

FEIL, B. The inverse yield–protein relationship in cereals: possibilities and limitations for genetically improving the grain protein yield. Trends Agron, 1:103-119, 1997.

FERRANDON, M., CHAMEL, A. Cuticular retention, foliar absorption and translocation of Fe, Mn, and Zn supplied in organic and inorganic form. J. Plant Nutr., v. 11, p. 248-263, 1988.

GALRÃO, E.Z. Micronutrientes. In: SOUSA, D.M.G. de; LOBATO, E. (Ed.). Cerrado: correção do solo e adubação. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. p.185-226.

GARVIN, D.F.; WELCH, R.M.; FINLEY, J.W. Historical shifts in the seed mineral micronutrient concentrations of US hard red winter wheat germplasm. Journal of the Science of Food and Agriculture, 86(13):2213-2220, 2006.

GENC, Y.; HUMPHRIES, J.M.; LYONS, G.H.; GRAHAM, R.D. Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 18:319-324, 2005.

GIBSON, R.S. Zinc: the missing link in combating micronutrient malnutrition in developing countries. Proc. Nutr. Soc., 65:51-60, 2006.

GODFRAY, H.C.J.; BEDDINGTON, J.R.; CRUTE, I.R.; HADDAD, L.; LAWRENCE, D.; MUIR, J.F.; PRETTY, J.; ROBINSON, S.; THOMAS, S.M.; TOULMIN, C. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. Science, 327:812-818, 2010.

GOMEZ-BECERRA, H.F.; ERDEM, H.; YAZICI, A.; TUTUS, Y.; TORUN, B.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. Grain concentrations of protein and mineral nutrients in a large collection of spelt wheat grown under different environments. J Cereal Sci 52:342-349, 2010a.

GOMEZ-BECERRA, H.F.; ABUGALIEVA, A.; MORGOUNOV, A.; ABDULLAYEV, K.; BEKENOVA, L.; YESSIMBEKOVA, M.; SEREDA, G.; SHPIGUN, S.; TSYGANKOV, V.; ZELENSKIY, Y.; PENA, R.J.; CAKMAK, I. Phenotypic correlations, G x E interactions and broad sense heritability analysis of grain and flour quality characteristics in high latitude spring bread wheats from Kazakhstan and Siberia. Euphytica 171:23-38, 2010b.

GUERINOT, M.L. The ZIP family of metal transporters. Biochim Biophys Acta, 1465:190-198, 2000.

GUPTA, U.C. Iron statues of crops in Prince-Edward-Island and effect of soil-pH on plant iron concentration. Can J Soil Sci 71:197-202, 1991.

GUR, A.; ZAMIR, D. Unused natural variation can lift yieldbarriers in plant breeding. Plos. Biol., 2:1610-1615, 2004.

GRAHAM, R.D.; ASCHER, J.S.; HYNES, S.C. Selection of zinc efficient cereal genotypes for soils of low zinc status. Plant Soil 146:241-250, 1992.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M. Breeding for staple-food crops with high micronutrient density: long-term sustainable agricultural solutions to hidden hunger in developing countries. In: Proceedings of the Agricultural Strategies for Micronutrients, Washington, IFPRI, 1996. 73p.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M.; BOUIS, H.E. Addressing micronutrient malnutrition through enhancing the nutritional quality of staple foods: principles, perspectives and knowledge gaps. Advances in Agronomy, 70:77-142, 2001.

GRAHAM, R.D. Biofortification: a global challenge program. International Rice Research Notes 28:4-8, 2003.

GRAHAM, R.D.; WELCH, R.M.; SAUNDERS, D.A.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; BOUIS, H.E.; BONIERBALE, M.; HAAN, S.; BURGOS, G.; THIELE, G.; LIRIA, R.; MEISNER, C. A.; BEEBE, S.E.; POTTS, M.J.; KADIAN, M.; HOBBS, P.R.; GUPTA, R.K.; TWOMLOW, S. Nutritious subsistence food systems. Advances in Agronomy, 92:1-74, 2007.

HARVESTPLUS. Desenvolvendo Produtos Agrícolas mais Nutritivos. Washington: HarvestPlus, 2004. 4p.

HARVESTPLUS. Breeding crops for better nutrition. Washington: CGIAR, 2009. 4p. In: http://www.harvestplus.org (acessado em 22 de julho de 2013).

HASLETT, B.S.; REID, R.J.; RENGEL, Z. Zinc mobility in wheat: uptake and distribution of zinc applied to leaves or roots. Ann Bot, 87:379-386, 2001.

HOTZ, C.; BROWN, K.H. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations. Food and Nutrition Bulletin, 25(1):130-162, 2004.

INOCÊNCIO, M.F.; RESENDE, A.V.; NETO, A.E.F.; VELOSO, M.P.; FERRAZ, F.M.; Hickmann, C. Resposta da soja à adubação com zinco em solo com teores acima do nível crítico. Pesq. agropec. bras. Brasília, 47 (10):1550-1554, 2012.

JEONG, J.; GUERINOT, M.L. Biofortified and bioavailable: The gold standard for plant-based diets, PNAS, 6:1777-1778, 2008.

JOSHI, A.K.; CROSSA, J.; ARUN, B.; CHAND, R.; TRETHOWAN, R.; VARGAS, M.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Genotype environment interaction for zinc and iron concentration of wheat grain in eastern Gangetic plains of India. Field Crop. Res. 116:268-277, 2010.

KARAMI, M.; AFYUNI, M.; KHOSHGOFTARMANESH, A.H.; PAPRITZ, A.; SCHULIN, R. Grain zinc, iron and copper concentrations of wheat grown in central Iran and their relationships with soil and climate variables. J Agric Food Chem 57:10876-10882, 2009.

KOEHLER, P.; HARTMANN, G.; WIESER, P.; RYCHLIK, M. Changes of folates, dietary fiber, and proteins in wheat as affected by germination. Journal Agricultural and Food Chemistry, 55:4678-4683, 2007.

KUTMAN, U.B.; YILDIZ, B.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. Biofortification of durum wheat with zinc through soil and foliar applications of nitrogen. Cereal Chem 87:1-9, 2010.

KUTMAN, U.B.; YILDIZ, B.; CAKMAK, I. Improved nitrogen status enhances zinc and iron concentrations both in the whole grain and the endosperm fraction of wheat. J Cereal Sci 53:118-125, 2011a.

KUTMAN, U.B.; YILDIZ, B.; CAKMAK, I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization, and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat. Plant Soil 342:149-164, 2011b.

LADIZINSKY, G. Plant evolution under domestication. Kluwer, Dordrecht, 1998.

LYONS, G.; STANGOULIS, J.; GRAHAM. R. High-selenium wheat: Biofortification for better health *Nutrition Research Reviews* 16(1):45-60, 2003.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e perspectivas. 2 ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 201p.

MARSCHNER, H. Zinc uptake from soils. In: Robson AD (ed) Zinc in Soils and Plants. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 59-77, 1993.

MAYER, J.E.; PFEIFFER, W.H.; BEYER, P. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition, Curr. Opin. Plant Biol., 11:166-170, 2008.

MESQUITA, F.R.; CORRÊA, A.D.; ABREU, C.M.P.; LIMA, R.A.Z.; ABREU, A.F.B. Linhagens de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*): composição química e digestibilidade protéica. Ciência. Agrotec. Lavras, 3(4):1114-1121, 2007.

MORAES, M.F.; NUTTI, M.R.; WATANABE, E.; CARVALHO, J.L.V. Práticas agronômicas para aumentar o fornecimento de nutrientes e vitaminas nos produtos agrícolas alimentares. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AGROPECUÁRIA SUSTENTÁVEL, Viçosa. Anais. Viçosa, Agricultura, Pecuária e Cooperativismo: 2009. 300-312p.

MORGONUOV, A.; GÓMEZ-BECERRA, H.F.; ABUGALIEVA, A.; DZHUNUSOVA, M.; YESSIMBEKOVA, M.; MUMINJANOV, H.; ZELENSKIY, Y.; OZTURK, L.; CAKMAK, I. Iron and zinc grain density in common wheat grown in Central Asia. Euphytica 155:193-203. 2007.

MURPHY, K.M.; REEVES, P.G.; JONES, S.S. Relationship between yield and mineral nutrient concentrations in historical and modern spring wheat cultivars. Euphytica, 163:381-390, 2008.

MCDONALD, G.K.; GENC, Y.; GRAHAM, R.D. A simple method to evaluate genetic variation in grain zinc concentration by correcting for differences in grain yield. Plant Soil, 306:49-55, 2008

NESTEL, P.; BOUIS, H.E.; MEENAKSHI, J.V.; PFEIFFER, W. Biofortification of staple food crops. J. Nutr., 136:1064-1067, 2006.

OLIVEIRA, E.L. Sugestão de adubação e calagem para culturas de interesse econômico no Estado do Paraná. Londrina: IAPAR (Circular, n° 128):2003. 30p.

ORTIZ-MONASTERIO, J.I.; SAYRE, K.D.; RAJARAM, S.; MCMAHON, M. Genetic progress in wheat yield and nitrogen use efficiency under four nitrogen rates. Crop Sci 37: 898-904, 1997.

ORTIZ-MONASTERIO, I.; GRAHAM, R.D. Breeding for trace mineral in wheat. Food Nutr. Bull. 21:392-396, 2000.

PEARSON, J.N.; RENGEL, Z. Distribution and remobilization of Zn and Mn during grain development in wheat. J Exp Bot 46(288):1829-1835, 1994.

PECK, A.W.; MCDONALD, G.K.; GRAHAM, R.D. Zinc nutrition influences the protein composition of flour in bread wheat (Triticum aestivum L.). J Cereal Sci 47:266-274, 2008.

PELEG, Z.; SARANGA, Y.; YAZICI, A.; FAHIMA, T.; OZTURK, L; CAKMAK, I. Grain zinc, iron and protein concentrations and zinc-efficiency in wild emmer wheat under contrasting irrigation regimes. Plant Soil, 57-67, 2008.

PETERSON, C.J.; JOHNSON, V.A.; MATTERN, P.J. Influence of cultivar and environment on mineral and protein concentrations of wheat flour, bran, and grain. Cereal Chem. 63:118-186, 1986.

PIMENTEL-GOMES, F. & GARCIA, C.H. Estatística aplicada a experimentos agronômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba, FEALQ, 2002. 309p.

PFEIFFER, W.H.; MCCLAFFERTY, B. HarvestPlus: breeding crops for better nutrition. Crop Science, 47:88-105, 2007.

PRASAD, A.S. Zinc: Mechanisms of host defense. J. Nutr., 137:1345-1349, 2007.

QAIM, M.; STEIN, A.J.; MEENAKSHI, J.V. Economics of biofortification. Agric. Econ., 37: 119-133, 2007.

RABOY, V.; DICKINSON, D.B.; BELOW, F.E. Variation in seed total 20 Cereal Chemistry, phytic acid, zinc, calcium, magnesium, and protein among lines of *Glycine max* and *G. sojae*. Crop Sci. 24:431-434, 1994.

RAIJ. B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H. & QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. IAC, 2001. 285p

RAMOS, R.A.; MURCHIE, E.; ANUKUL, N.; BENNETT, M.; AROCENA, E.C.; GARCIA, G.D.G.; MANAOIS, R.; JULATON, M.; STANGOULIS, J.; GRAHAM, R. Rice biofortification. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A 146:243-253, 2007.

RATTAN, R.K.; DEB, D.L. Self-diffusion of zinc and iron in soils as affected by pH, CaCO3, moisture, carrier and phosphorus levels. Plant Soil 63:377-393, 1981.

RENGEL, Z.; GRAHAM, R.D. Importance of seed zinc content for wheat growth on zinc deficient soil. I. vegetative growth. Plant Soil 173:259-266, 1995.

RENGEL, Z.; GRAHAM, R.D. Uptake of zinc from chelatebuffered nutrient solutions by wheat genotypes differing in zinc efficiency. J Exp Bot 47:217-226, 1996.

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

SCHAAF, G.; SCHIKORA, A.; HABERLE, J.; VERT, G.; LUDEWIG, U.; BRIAT, J.F.; CURIE, C.; VON EIREN, N. A putative function for the *Arobidopsis* Fe-Phytosiderophore transporter homolog AtYSL2 in Fe and Zn homeostasis. Plant Cell Physiol, 46:762-774, 2005.

SCHEEREN, P.L.; CARVALHO, J.L.V.; NUTTI, M.R.; CAIERÃO, E.; BASSOI, M.C.; ALBRECHT, J.C.; CASTRO, R.L.; MIRANDA, M.Z.; TORRES, G.A. M.; TIBOLA, C.S. Biofortificação em trigo no Brasil. In: Reunião Anual de Biofortificação no Brasil, Terezina – Piaui, Anais: IV Reunião Anual de Biofortificação no Brasil, 2011.

SHIWAY, Y.S.; KUMAR, D.; PRASAD, R. Effect of zinc-enriched urea on productivity, zinc uptake and efficiency of an aromatic ricewheat cropping system. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 81:229-243, 2008.

STANGOULIS, J.; SISON, C. Harvestplus: Editors Crop Sampling Protocols for micronutrient Analysis. Breeding Crops for Better Nutrition, 2008.

TANKSLEY, S.D.; MCCOUCH, S.R. Seed banks and molecular maps: unlocking genetic potential from the wild. Science 277:1063-1066, 1997.

TER BRAAK, C.J.F. & P. SMILAUER. 2002. CANOCO Reference manual and CanoDraw for Windows user's guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5). Ithaca, Microcomputer Power, 500p.

UAUY, C.; DISTELFELD, A.; FAHIMA, T.; BLECHL, A.; DUBCOVSKY, J. A NAC gene regulating senescence improves grain protein, zinc, and iron content in wheat. Science 314:1298-1301, 2006.

WATERS, B.M.; UAUY, C.; DUBCOVSKY, J.; GRUSAK, M.A. Wheat (Triticum aestivum) proteins regulate the translocation of iron, zinc, and nitrogen compounds from vegetative tissues to grain. J Exp Bot 60:4263-4274, 2009.

WELCH, R.M.; COMBS, G.F.; DUXBURY, J.M. Toward a “greener” revolution. Issues in Science and Technology, 14 (1):50-58, 1997

WELCH, R.M.; GRAHAM, R.D. New paradigm for world agriculture: meeting human needs. Productive, sustainable nutritious. Field Crops Res., 60:1-10, 1999a.

WELCH, R.M. Importance of seed mineral nutrient reserves in crop growth and development. In: Rengel Z (ed) Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications. Food Products Press, New York, 205-226p, 1999b.

WELCH, R.M. Micronutrients, agriculture and nutrition: linkages for improved health and well being. In: SINGH, K.; MORI, S.; WELCH, R. M. (Ed.). Perspectives on the micronutrient nutrition of crops. Jodhpur: Scientific Publishers, 247-289, 2001.

WELCH, R.M.; GRAHAM, R.D. Breeding for micronutrients in staple food crops from a human nutrition perspective. Journal of Experimental Botany, 55:353-364, 2004.

WELCH, R.M. Importance of seed mineral nutrient reserves in crop growth and development. In: Rengel Z (ed) Mineral nutrition of crops: Fundamental mechanisms and implications. Food Products Press, New York, 205-226p, 2006.

WELCH, R.M. Linkages between trace elements in food crops and human health. In: ALLOWAY, B. J. (Ed.). Micronutrient deficiencies in global crop production. New York: Springer, 287-309, 2008.

WILKINSON, H.F.; LONERAGAN, J.F.; QUICK, J.P. The movement of zinc to plant roots. Soil Sci Soc Amer Proc 32:831-833, 1968.

WHITE, M., BAKER, F., CHANEY, R. et al. A. Metal complexation in xylem fluid. II. Theoretical equilibrium model and computational computer program. **Plant. Physiol** ., v. 67, p. 301-310, 1981.

WHITE, P.J.; BROADLEY, M.R. Biofortifying crops with essential mineral elements. Trends in Plant Science, 10:586-593, 2005.

YILMAZ, A.; EKIZ, H.; TORUN, B.; GULTEKIN, I.; KARANLIK, S.; BAGCI, S.A.; CAKMAK, I. Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat grown on zinc-deficient calcareous soils in Central Anatolia. Journal of Plant Nutrition, 20 (4-5):461-471, 1997.

ZEBARTH, B.J.; WARREN, C.J.; SHEARD, R.W. Influence of the rate of nitrogen fertilization on mineral content of winter wheat in Ontario. J Agric Food Chem 40:1528-1530, 1992.

ZEITUNE, M.I.P.; RAMON, A.N.; ELENA, M.; CADENA, C. Um nutriente Essencial na Adolescência – Valorização Nutricional do Zinco. Revista Adolesc. Latinoam. 2 (2): Porto Alegre, 2001.

ZIMMERMANN, F.J.P. Estatística aplicada à pesquisa agrícola. Santo Antônio de Goiás, GO: Embrapa Arroz e Feijão, 402p, 2004.

ZOU, C.Q.; ZHANG, Y.Q.; RASHID, A.; RAM, H.; SAVASLI, E.; ARISOY, R.Z.; ORTIZ-MONASTERIO, I.; SIMUNJI, S.; WANG, Z.H.; SOHU, V.; HASSAN, M.; KAYA, Y.; ONDER, O.; LUNGU, O.; YAQUB MUJAHID, M.; JOSHI, A.K.; ZELENSKIY, Y.; ZHANG, F.S.; CAMA, I. Biofortification of wheat with zinc through zinc fertilization in seven countries. Plant Soil, 361:119-130, 2012.

ZHAO, F.J.; SU, Y.H.; DUNHAM, S.J.; RAKSZEGI, M.; BEDO, Z.; MCGRATH, S.P.; SHEWRY, P.R. Variation in mineral micronutrient concentrations in grain of wheat lines of diverse origin. J Cereal Sci 49:290-295, 2009.

ZHANG, Y.Q.; SHI, R.L.; KARIM, M.R.; ZHANG, F.S.; ZOU, C.Q. Iron and zinc concentrations in grain and flour of winter wheat as affected by foliar application. J Agric Food Chem 58:12268-12274, 2010a.

ZHANG, Y.; SONG, Q.; YAN, J.; TANG, J.; ZHAO, R.; ZHANG, Y.; HE, Z.; ZOU, C.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Mineral element concentrations in grains of Chinese wheat cultivars. Euphytica 174:303-313, 2010b.

ZHANG, Y.Q.; SUN, Y.X.; YE, Y.L.; KARIM, M.R.; XUE, Y.F.; YAN, P.; MENG, Q.F.; CUI, Z.L.; CAKMAK, I.; ZHANG, F.S.; ZOU, C.Q. Zinc biofortification of wheat through fertilizer applications in different locations of China. Field Crop Res 125:1-7, 2012.

ZHU, C.F.; NAQVI, S.; GOMEZ-GALERA, S.; PELACHO, A.M.; TERESA CAPELL, T.; CHRISTOU, P. Transgenic strategies for the nutritional enhancement of plants, Trends Plant Sci., 12:1360-1385, 2007.

7. RESUMO BIOGRÁFICO

JOÃO AUGUSTO LOPES PASCOALINO, filho de João Batista Pascoalino e Helena Aparecida Lopes Pascoalino, nasceu em 08 de Junho de 1987, no município de Jandaia do Sul-PR. Em 2007 ingressou no curso de Agronomia da Universidade Estadual de Maringá (UEM) – Campus Maringá, graduando-se em 2011. De fevereiro de 2012 a fevereiro de 2014, realizou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo, na área de Propriedades e Processos Bioquímicos nos Ecossistemas, sob orientação do Prof. Dr. Milton Ferreira de Moraes, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Em novembro 2013 selecionado para o Curso de Doutorado, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Paraná (UFPR), sob orientação do Prof. Dr. Milton Ferreira Moraes, com provável conclusão no ano de 2016.