

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO – PR

**BIOFORTIFICAÇÃO COM ZINCO EM
FORRAGEIRAS DE INVERNO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

KARIN KAMILA BIRCK LOPES DE MATOS

GUARAPUAVA-PR

2022

KARIN KAMILA BIRCK LOPES DE MATOS

BIOFORTIFICAÇÃO COM ZINCO EM FORRAGEIRAS DE INVERNO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Fabrício William de Ávila – UNICENTRO

Orientador

Prof. Dr. Marcelo Marques Lopes Muller – UNICENTRO

Coorientador

Prof. Dr. Orcial Ceolin Bortolotto – UEPG

Coorientador

GUARAPUAVA-PR

2022

KARIN KAMILA BIRCK LOPES DE MATOS

BIOFORTIFICAÇÃO COM ZINCO EM FORRAGEIRAS DE INVERNO

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 30 de agosto de 2022.



Prof. Dr. Fabrício William de Ávila
(UNICENTRO)



Prof.^a. Dr.^a. Carla Fernanda Ferreira
(UNICENTRO)



Prof. Dr. Silvio Junio Ramos
(Instituto Tecnológico Vale)

GUARAPUAVA-PR
2022

Catálogo na Publicação
Rede de Bibliotecas da Unicentro

M433b Matos, Karin Kamila Birck Lopes de
Biofortificação com zinco em forrageiras de inverno / Karin Kamila Birck
Lopes de Matos. -- Guarapuava, 2022.
x, 56 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste,
Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Área de Concentração:
Produção Vegetal, 2022.

Orientador: Fabrício William de Ávila
Coorientador: Marcelo Marques Lopes Muller, Orcial Ceolin Bortolotto
Banca examinadora: Carla Fernanda Ferreira, Sílvio Júnio Ramos

Bibliografia

1. Micronutriente. 2. Agricultura. 3. Nutrição de plantas. 4. Forragem. 5.
Pecuária. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

CDD 630

Ao meu companheiro que, nestes últimos
dois anos, se fez esposo e melhor amigo,
sem seu apoio este trabalho não seria
concluído.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus e aos bons espíritos que me acompanham

Aos meus pais e familiares, pelo apoio incondicional

Ao meu amado Fernando, por todo seu amor, cuidado, carinho, atenção e, principalmente, paciência comigo; por tomar como sua esta empreitada; por tudo e por tanto que fez e faz por mim todos os dias

Aos meus amigos, Vinicius Iura e Fernanda Lipori, que, mesmo distantes, se fizeram presentes e me consolaram inúmeras vezes nos piores momentos que passei

Aos professores e colaboradores da Unicentro, em especial meu orientador Prof^o Fabrício Ávila, e a minha supervisora de estágio docência, Prof^a Carla F. Ferreira, pela paciência e disponibilidade sempre que precisei

À equipe do laboratório de Solos de Unicentro, principalmente Luiz Henrique, Ana Paula e Ana Caroline, por toda a ajuda e boas conversas durante o período de análises

Aos colegas do grupo de nutrição mineral de plantas, Júlio César B. Vidigal, Wagner Deckij Kachinski, Allan Deckij Kachinski, Poliana Horst Petranski, Gabriela Frigo Fernandes e Luís Henrique Kapp Titski, que de alguma forma colaboraram para a realização deste trabalho

A todos os colegas de mestrado que partilharam seus conhecimentos nas horas difíceis

Às colegas de apartamento que se tornaram grandes amigas, Bruna e Geovanna, pela paciência, carinho e compreensão com esta estudante ansiosa

Às amigas de mestrado que levarei no coração, Fabiéli Klüge, Caroline Vier, Rosirene Oliveira

A Johann Zuber Júnior por sua amizade, por ceder todo o necessário para a realização do experimento em campo, bem como ao Geraldo e a todos os demais colaboradores das fazendas Fruteira, Santa Izulina e Riacho Fundo, pela ajuda durante a condução do experimento

À Savannah e à Bebezinha, por todos os bons momentos que tivemos juntas nesta vida

À Capes e ao CNPq, pela concessão da bolsa e financiamento deste estudo

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	i
LISTA DE FIGURAS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	2
2.1 Objetivo geral.....	2
2.2 Específicos	2
3 REFERENCIAL TEÓRICO	3
3.1 Insegurança alimentar e nutricional	3
3.2 Zinco	4
3.2.1 Zinco na saúde animal	4
3.2.2 Zinco no solo e na planta	5
3.2.3 Biofortificação com zinco.....	7
3.3 Cultivo de plantas estivais na região Sul do Brasil.....	8
3.3.1 Aveia preta	9
3.3.2 Azevém	10
3.3.3 Centeio	11
3.4 Referências Bibliográficas	12
4 BIOFORTIFICAÇÃO DE ZINCO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM FORRAGEIRAS DE INVERNO	18
4.1 Resumo	18
4.2 Abstract.....	18
4.3 Introdução	19
4.4 Material e Métodos	21
4.4.1 Área experimental, instalação e condução do experimento.....	21
4.4.2 Delineamento experimental, tratamentos e avaliações	23
4.5 Resultados e Discussão	26
4.5.1 Produção de matéria seca.....	26
4.5.2 Biofortificação de Zn	26
4.5.3 Teores de outros nutrientes na matéria seca	31
4.5.4 Exportações de nutrientes	41
4.6 Conclusões	50
4.7 Referências Bibliográficas	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da análise química do solo da área experimental em amostra composta da camada de 0-20 cm de profundidade (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	22
Tabela 2. Descrição dos 12 tratamentos de adubação de Zn aplicados nas três espécies forrageiras de inverno: azevém, centeio e aveia preta (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).	24
Tabela 3. Quadrados médios da análise de variância para peso de matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	26
Tabela 4. Quadrados médios da análise de variância para teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	27
Tabela 5. Quadrados médios da análise de variância para teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	32
Tabela 6. Teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em g kg ⁻¹ , na matéria seca de parte aérea de azevém e centeio, aos 161 e 157 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).	34
Tabela 7. Teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em g kg ⁻¹ , na matéria seca de parte aérea de aveia preta, aos 151 DAS, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).	35
Tabela 8. Quadrados médios da análise de variância para teores de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	37
Tabela 9. Teores de micronutrientes (Fe, Mn e Cu), em mg kg ⁻¹ , na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).	39
Tabela 10. Quadrados médios da análise de variância para exportações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	42
Tabela 11. Quadrados médios da análise de variância para exportações de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).....	43

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Valores decêndios de precipitação pluviométrica e temperatura máxima e mínima no campo experimental durante o período de condução dos experimentos com as três espécies forrageiras de inverno (entre 28 de maio a 06 de novembro de 2018) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).22
- Figura 2.** Teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).28
- Figura 3.** Teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022)......29
- Figura 4.** Exportações de nutrientes com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022)......45
- Figura 5.** Exportação de Cu com a colheita da biomassa de azevém (aos 161 DAS), exportação de Ca com a colheita da biomassa de centeio (aos 157 DAS), e exportação de Fe com a colheita da biomassa de aveia preta (aos 151 DAS), em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022)......48
- Figura 6.** Exportação de Zn com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).49
- Figura 7.** Exportação de Zn com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022)......49

RESUMO

Karin Kamila Birck Lopes de Matos. Biofortificação com zinco em forrageiras de inverno.

A biofortificação com zinco (Zn) em culturas forrageiras de inverno pode ser uma eficiente estratégia de curto prazo para amenizar problemas de desnutrição deste micronutriente em humanos e animais. Os objetivos dessa pesquisa foram estudar os efeitos da aplicação de Zn no solo e via pulverizações foliares sobre a produção de forragem (azevém, centeio e aveia preta), biofortificação e exportações de nutrientes da área de cultivo. Para cada espécie forrageira estudada, azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), centeio (*Secale cereale* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), o delineamento experimental foi em blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições, sob esquema de parcela subdividida. Nas parcelas estudou-se o fornecimento de Zn na adubação de semeadura (sem e com Zn) e nas subparcelas avaliou-se a aplicação de doses (400 e 800 g ha⁻¹ de Zn) e duas épocas (E1 e E2) de pulverização foliar. Aproximadamente aos 156 DAS, a parte aérea dessas três espécies forrageiras foi colhida em cada subparcela e determinou-se a massa seca e o teor de Zn no material vegetal. O Zn no solo e via foliar não afetou significativamente a produção de biomassa. Tanto o fornecimento de Zn no solo quanto as pulverizações foliares elevaram o teor de Zn na matéria seca de parte aérea das três espécies forrageiras. O incremento de Zn na biomassa vegetal foi maior em pulverizações foliares realizadas mais tardiamente. Para uma mesma época de pulverização, a maior dose de Zn apresentou maior efeito em incrementar a concentração de Zn na parte aérea das forrageiras. Assim, os fornecimentos de Zn no solo e via pulverizações foliares não afetaram a produção de forragem, mas incrementaram o teor do elemento na biomassa das forrageiras estudadas. Ainda, o fornecimento de Zn no solo incrementou os teores na N, Ca e diminuiu os de Cu e Mn da parte aérea das espécies forrageiras.

Palavras chave: micronutriente, agricultura, nutrição de plantas, forragem, pecuária.

ABSTRACT

Karin Kamila Birck Lopes de Matos. Zinc biofortification in winter forage crops.

Biofortification with zinc (Zn) in winter forage crops can be an efficient short-term strategy to alleviate malnutrition problems of this micronutrient in humans and animals. The objectives of this work were to study the effects of Zn application in the soil and via foliar spray on forage yield (ryegrass, rye and black oats), forage biofortification and nutrient exports from the cultivated area. For each forage species, ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.), rye (*Secale cereale* L.) and black oat (*Avena strigosa* Schreb.), the experimental design was in a randomized complete block, with four replications, in a split-plot design. In plots, the supply of Zn in the sowing fertilization (without and with Zn) was studied. In subplots, the application of doses (400 and 800 g ha⁻¹ of Zn) and two times (T1 and T2) of foliar spraying were evaluated. At approximately 156 DAS, the shoot of the three forage species was collected in each subplot and the dry matter weight and the concentration of nutrients in the shoot materials were determined. Soil and foliar Zn application did not significantly affect biomass yield. Both soil Zn supply and foliar Zn sprays increased the Zn concentration in the shoot dry matter of the three forage species. The increase of Zn in plant biomass was greater in foliar sprays performed in T2. For the same spraying season, the highest Zn dose (800 g ha⁻¹) had the greatest effect in increasing the Zn concentration in the shoot of the forages. Thus, the Zn supplies in the soil and via foliar sprays did not affect forage yield, but increased the element concentration in the biomass of the studied forages. Furthermore, the Zn supply in the soil increased the levels of N, Ca and decreased the levels of Cu and Mn in the shoot of the forage species.

Keywords: micronutrient, agriculture, plant nutrition, forage, livestock.

1 INTRODUÇÃO

A insegurança alimentar e nutricional é uma ameaça à saúde humana, sendo a principal causa de desnutrição. A fome oculta é um tipo comum de deficiência nutricional resultante da ingestão insuficiente de nutrientes como ferro (Fe), zinco (Zn), iodo (I), selênio (Se) e vitamina A. Tal condição pode atingir quaisquer organismos de diferentes faixas etárias, independentemente da renda dos indivíduos.

O consumo diário de alimentos ricos em Zn é essencial à síntese enzimática e manutenção do equilíbrio hormonal em mamíferos. Assim, tal nutriente contribui para o bom funcionamento dos sistemas nervoso central, imunológico e reprodutivo, além de melhorar a formação de tecidos ósseos, garante a renovação celular e potencializa a ação antioxidante. Não obstante, a ingestão de doses adequadas desse nutriente previne a ocorrência de cardiomiopatias, câncer e dermatites.

No entanto, humanos e outros mamíferos apresentam deficiências nutricionais causadas por dietas contendo teores insuficientes desses nutrientes. No caso do Zn, a maioria dos solos agrícolas é pobre neste micronutriente, o que limita a absorção pelos vegetais. Não obstante, o Zn também é um elemento essencial para as espécies vegetais, e sua deficiência no solo afeta negativamente a produtividade das culturas. Esse elemento é conhecido por ser pouco móvel no floema, fazendo jus ao fornecimento via foliar, direcionando-o para as folhas novas, frutos e grãos que serão colhidos.

Nesse contexto, o fornecimento de Zn às culturas e forrageiras como azevém, centeio e aveia, seja via solo e/ou foliar, pode melhorar a produtividade das lavouras e, ainda, elevar os teores de Zn em folhas e forragens para alimentação animal. Dessa forma, a biofortificação de espécies forrageiras com Zn pode melhorar a produtividade vegetal e influenciar positivamente no crescimento e desempenho reprodutivo animal. Sendo assim, animais bem nutridos podem concentrar mais Zn na carne e no leite, para posterior ingestão pelos humanos com o consumo de produtos de origem animal.

Há poucos estudos sobre a aplicação de Zn em forrageiras de inverno cultivadas no sul do Brasil para produção de pré-secado e seus efeitos benéficos na produção vegetal, nutrição da planta e qualidade nutricional do alimento obtido. Neste sentido, estudos de biofortificação de plantas com Zn trarão resultados importantes para a produção vegetal e o melhoramento da nutrição humana e animal.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Os objetivos desse trabalho foram estudar os efeitos da aplicação de zinco (Zn) no solo e via pulverizações foliares sobre a produção de biomassa de azevém, centeio e aveia preta, biofortificação da forragem com Zn e teores e exportações de nutrientes da área de cultivo.

2.2 Específicos

Avaliar se a adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares afetam a produção e seu teor na biomassa de parte aérea de forrageiras de inverno (azevém, centeio e aveia preta);

Comparar os resultados da aplicação de Zn no solo e via pulverizações foliares para averiguar o melhor método de fornecimento de Zn para enriquecer com esse micronutriente a biomassa de parte aérea das espécies forrageiras estudadas;

Determinar os teores de nutrientes na matéria seca e quantificar as exportações de nutrientes da área experimental com a colheita da biomassa de parte aérea das espécies forrageiras.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Insegurança alimentar e nutricional

O consumo de dietas restritas a alimentos pobres em micronutrientes é o principal fator para a incidência de fome oculta. Esse tipo de deficiência está associado à insegurança alimentar e nutricional, podendo ser em função de vitamina A, Fe, Zn, I e Se (BIESALSKI, 2013a; WHO, 2014). Nesse sentido, a falta de acesso a alimentos seguros, nutritivos e suficientes faz parte do cotidiano de mais de 2 bilhões de pessoas ao redor do mundo (FAO, 2020).

A fome oculta é facilmente correlacionada a fatores de vulnerabilidade social, como renda familiar mensal, tipo de moradia e quantidade de pessoas que a habitam (BEZERRA et al., 2017). Entretanto, essa carência nutricional pode afetar a obesos e magros, ricos e pobres, devido ao elevado consumo de alimentos industrializados. Todavia, o diferencial está na condição financeira para variar os componentes da dieta, assim como adquirir suplementos dietéticos minerais (BIESALSKI, 2013b).

Embora a suplementação dietética apresente bom custo benefício, a longo prazo essa prática não é viável, principalmente aos cofres públicos. Com o intuito de garantir a nutrição de milhões de pessoas, o economista Howart Bouis, do International Food Policy Research Institute (IFPRI), apresentou suas ideias em busca de recursos para financiar pesquisas, ainda na década de 1990. Então, o programa de cooperação internacional para biofortificação de alimentos foi criado em 2000 e renomeado de “HarvestPlus” em 2003 (HARVESTPLUS, 2020a).

O HarvestPlus coordena estudos de biofortificação através do melhoramento convencional, selecionando variedades com alto potencial de rendimento e acúmulo de nutrientes, além de pesquisar o fornecimento de fertilizantes contendo Fe, Zn, I e Se às culturas. Também educa agricultores e consumidores sobre a importância dos alimentos biofortificados a fim de construir mercado para os produtos (HARVESTPLUS, 2020a).

Segundo dados do programa, em 2019, 63 países da América Latina, Caribe, África e Ásia realizaram ou iniciaram testes com variedades biofortificadas de alimentos básicos. Ao todo, mais de 42 milhões de pessoas foram beneficiadas com o consumo de mandioca, trigo, arroz, milho e batata-doce amarela (HARVESTPLUS, 2020b).

O Brasil colabora diretamente com o HarvestPlus através da Rede BioFort. A Embrapa Agroindústria de alimentos lidera as pesquisas realizadas em parceria com universidades, centros de pesquisa nacionais e internacionais e outros órgãos públicos e não governamentais desde 2003. As principais culturas melhoradas no país são arroz, feijão comum e caupi, mandioca, batata-doce, milho, abóbora e trigo (NUTTI, 2011). A empresa também busca industrializar os produtos biofortificados sem que sua concentração nutritiva seja alterada (BIOFORT, 2020).

A condução de pesquisas em biofortificação de componentes básicos da dieta dos brasileiros é de suma importância, pois estima-se que mais de 20% da população seja deficiente em Zn, principalmente crianças, as quais têm crescimento e desenvolvimento comprometidos (PEDRAZA et al., 2017). O mesmo ocorre com o Se, já que as principais fontes são castanhas e pescados, nem sempre ao alcance de todas as famílias (FERREIRA et al., 2002).

3.2 Zinco

3.2.1 Zinco na saúde animal

O zinco (Zn) é um micronutriente essencial à saúde humana e animal. Em humanos, compõe a estrutura de tecidos, catalisa reações e funciona como íon regulador sendo relacionado a mais de 200 sistemas enzimáticos (CHASAPIS et al., 2012). Ademais, constitui enzimas do sistema nervoso central, atua nos sistemas reprodutivo e imunológico assim como na visão. Participa da transcrição e expressão de genes, divisão e morte celular, além de estabilizar membranas celulares (MAFRA; COZZOLINO, 2004).

A nutrição adequada com Zn e outros micronutrientes garante a sobrevivência do organismo e o desenvolvimento saudável. Recomenda-se que mulheres ingiram 8 mg dia⁻¹, homens 11 mg dia⁻¹, adolescentes 8,7 a 15 mg dia⁻¹, crianças (até 10 anos) 3,8 a 10,0 mg dia⁻¹, e bebês (até 12 meses) 3,3 a 5,6 mg dia⁻¹ de Zn (INSTITUTE OF MEDICINE et al., 2000; WHO, 2001).

No entanto, cerca de 17% da população mundial consome uma dieta pobre em Zn (HARVESTPLUS, 2020c). Os mais afetados são crianças com idade até cinco anos que podem falecer por complicações decorrentes de nanismo, diarreia e pneumonia (STEIN; BHUTTA, 2005). Adultos estão sujeitos ao hipogonadismo, danos oxidativos, baixa imunidade à malária e dermatites recorrentes. A deficiência de Zn no organismo também

prejudica a recuperação após esforço físico intenso, posto que os agentes antioxidantes dependem do Zn^{2+} (KOURY; DONANGELO, 2003).

A deficiência de Zn também está relacionada ao agravamento de doenças crônicas. Nesse contexto, Prasad (2014) observou efeito positivo da ação antioxidante e anti-inflamatória do Zn no tratamento de distúrbios degenerativos do envelhecimento. Portanto, o consumo adequado de Zn fortalece o sistema imunológico, principalmente de pacientes idosos acometidos por doenças como diabetes, depressão e Alzheimer (CHASAPIS et al., 2012).

Não somente os humanos, mas outros animais como bovinos (*Bos taurus* e *Bos indicus*, por exemplo) também necessitam de uma dieta rica em Zn para o funcionamento ótimo de seus metabolismos. Nesse sentido, as plantas são a principal fonte de Zn de baixo custo para a dieta animal. No entanto, é comum a baixa concentração desse mineral nas forrageiras cultivadas nos solos do Brasil.

A deficiência de Zn durante o crescimento prejudica a qualidade da massa óssea e o sistema imune animal (ROSSI et al., 2001). Nesse sentido, o fornecimento de suplementos enriquecidos com Zn aumenta a imunidade de bezerros e reduz a morbidade causada por doença respiratória bovina (GALYEAN; PERINO; DUFF, 1999).

A ingestão insuficiente de Zn afeta o desempenho reprodutivo em bovinos, pois o período que se estende do final da gestação ao início da lactação representa o pico de exigência metabólica (VALLE et al., 2003). Uma alternativa de alto custo para amenizar essa deficiência durante a reprodução é a injeção de princípio ativo contendo o elemento, que induz a síntese de somatotropina em fêmeas (*Bos taurus*), logo, a puberdade precoce, além de assegurar a prenhez (PICCOLO et al., 2018).

3.2.2 Zinco no solo e na planta

O zinco (Zn) é um fator limitante à maioria das culturas agrícolas e maior parte dos solos agricultáveis do mundo é deficiente nesse micronutriente. Não somente a baixa presença do elemento, mas fatores como alto pH e concentrações elevadas de calcita, cálcio, sódio e bicarbonato reduzem a disponibilidade de Zn do solo, assim como solos orgânicos ou ricos em fosfato lábil (ALLOWAY, 2009). O Zn no solo também é adsorvido por minerais da fração argilas, como o Fe_2O_3 .

A fração de Zn-disponível está na solução do solo na forma de complexos orgânicos solúveis que fluem até a zona radicular pelo gradiente de concentração (OLIVER; BARBER,

1966). Estabelecido o contato íon-raiz, o Zn^{2+} é absorvido em processo ativo e chega ao câmbio vascular via simplasto. No entanto, o íon pode utilizar a via apoplástica, aumentando o gasto de energia ao retornar a via simplástica. Então, é conduzido pelo xilema até a parte aérea, onde permanece na forma iônica dentro dos tecidos ou ligado às substâncias.

Na planta, o Zn é importante cofator e constituinte de várias enzimas, tais como a superóxido dismutase, álcool desidrogenase, desidrogenase glutâmica e anidrase carbônica (TAIZ et al., 2017). O Zn também está relacionado à taxa fotossintética da planta, pois ativa a anidrase carbônica e a ribulose-1,5-difosfato carboxilase, além de participar da síntese proteica, inibindo a enzima desintegradora de RNA e constituindo ribossomos. Também atua no metabolismo do nitrato (NO_3^-) e, além disso, está relacionado à síntese de auxinas (especialmente o ácido indol acético) de modo que sua presença estimula o crescimento das plantas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

No floema, a redistribuição de Zn se dá de folhas velhas para folhas jovens, assim como das folhas para os frutos. Entretanto, a taxa de redistribuição é tão baixa que são raras as concentrações de Zn acima de 100 mg kg^{-1} na massa seca de frutos, sementes e tubérculos. Para amenizar esse problema, programas globais de melhoramento genético buscam selecionar cultivares com maior potencial de acúmulo de Zn nas partes comestíveis das plantas cultivadas, pois a mobilidade de Zn na planta é fortemente influenciada pelo suprimento do elemento (WHITE; BROADLEY, 2011).

Sob extremas (deficiência ou excesso) concentrações de Zn, organismos superiores estão sujeitos a uma explosão oxidativa, ocasionada pela demasiada produção de espécies reativas de oxigênio (ROS), as quais peroxidam lipídeos e desregulam o metabolismo celular. Para conter a ação das ROS, a planta ativa enzimas e usa metabólitos antioxidantes (BLASCO; NAVARRO-LEÓN; RUIZ, 2018).

A toxidez de Zn nas plantas pode ser identificada pela clorose e área foliar reduzida, além da diminuição na absorção de K. Não obstante, o Zn pode se acumular no xilema, obstruindo a passagem da seiva (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). O excesso de Zn também inibe a biossíntese de clorofila, prejudicando a fotossíntese e a assimilação de carbono (CHEN et al., 2008; DHIR; SHARMILA; SARADHI, 2008). Outro possível dano é a diminuição do volume de raízes, refletindo em plantas com baixo crescimento (GIROTTO et al., 2013).

Ainda, em altas concentrações no solo, esse metal afeta tanto o crescimento quanto o desenvolvimento das plantas ao inibir a absorção de nutrientes, danificar raízes e desregular processos metabólicos. Na região sul do Brasil, foi relatada a ocorrência de toxidez por Zn em videiras e plantas de aveia cultivadas na entrelinha (AMBROSINI et al., 2016).

Sob condições de baixa disponibilidade de Zn no solo, a síntese de ácido-3-indolacético é comprometida nos vegetais, podendo haver clorose internerval nas folhas devido à menor síntese de clorofila. Além disso, o crescimento entrenós é reduzido de tal modo que as folhas, retorcidas e menores que o normal, ajustam-se ao redor desse caule baixo, caracterizando uma “roseta” (TAIZ et al., 2017).

O excesso de outros micronutrientes catiônicos no solo, tais qual o manganês (Mn^{2+}), reduz a absorção de Zn pelas plantas (VELOSO et al., 1995). Por outro lado, em níveis ótimos de Zn no solo, culturas como o arroz mostram-se mais tolerantes à seca e à salinidade, posto que o micronutriente é fator essencial à transcrição dos genes que carregam essas características. Ademais, um alelo desse gene, ao perturbar sua atividade na regulação da citocinina oxidase, ocasiona o acúmulo de citocina no meristema apical da planta, elevando o número de ramificações da panícula. Logo, a concentração adequada de Zn no meio de cultivo aumenta a capacidade de produção de grãos de arroz (LI et al., 2013).

3.2.3 Biofortificação com zinco

Embora a deficiência de zinco (Zn) seja frequentemente observada em populações de baixa renda, a má nutrição não se restringe somente às classes sociais desfavorecidas, incidindo principalmente em crianças em geral (PEDRAZA et al., 2017). Isso ocorre porque, além da disponibilidade do nutriente nos alimentos, substâncias antinutricionais (fitatos) inibem a absorção do Zn pelos organismos (FAO, 2020).

Nesse sentido, a biofortificação das culturas busca aumentar o teor nutricional de alimentos presentes na dieta básica da população mundial, seja pelo fornecimento de fertilizantes contendo micronutrientes ou pelo desenvolvimento de cultivares com maior potencial de acúmulo de nutrientes (MURGIA; DE GARA; GRUSAK, 2013).

Embora as concentrações totais de Zn na maioria dos solos sejam suficientes para suportar culturas com grande aporte de minerais, o acúmulo de Zn nas partes comestíveis das plantas cultivadas é frequentemente limitado por sua fitodisponibilidade e absorção pelas raízes das plantas (WHITE; BROWN, 2010). Em solos com teor de Zn abaixo de $0,7 \text{ mg dm}^{-3}$

ou até $1,5 \text{ mg dm}^{-3}$, o potencial de resposta das culturas agrícolas é elevado diante da aplicação desse micronutriente (RAIJ et al., 1996). Isso porque as exigências não atingem 1 kg ha^{-1} , de modo que o fornecimento, seja via solo ou foliar, apresenta bons resultados (GRAHAM et al., 2007).

Subbaiah et al (2016), visando aumentar a qualidade nutricional do milho com aplicações foliares de nanopartículas de ZnO, produziram grãos com $35,96 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn em função da aplicação de doses de 100 mg kg^{-1} do fertilizante. Arani, Namdari e Nazareli (2018), ao testarem a adubação com ZnSO_4 somada à incorporação da palhada de feijão remanescente, atingiram $3,8 \text{ t ha}^{-1}$ de grãos de trigo com 10,3% de proteína e 36 mg kg^{-1} de Zn.

Em cultivos hidropônicos de rúcula (*Eruca sativa*), Rugeles-Reyes et al. (2019) verificaram que a aplicação foliar de $1,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de Zn aos 25 dias após a emergência proporcionou maior teor de Zn nas folhas dessas plantas, sendo 278% superior aos resultados da testemunha.

Ao aplicarem dejetos líquidos de suíno com teor de Zn em torno de 110 mg kg^{-1} , 12 dias após a emergência de aveia cultivada em solo com $\text{pH}(\text{CaCl}_2)$ de 5,15, Mondardo et al. (2011a) observaram que não houve diferença significativa na matéria seca (MS), fibra em detergente neutro (FDN), matéria mineral (MM) e matéria orgânica (MO). No entanto, as plantas apresentaram maior acúmulo de N, P, K, Ca e Zn em parte aérea. Além disso, a proteína bruta e a fibra em detergente ácido mostraram aumento significativo, sendo 0,91% de crescimento linear para PB, conforme aumentou-se a dose de dejetos.

Por outro lado, em solos com $0,9 \text{ mg kg}^{-1}$ de Zn e pH de 5,5, a aplicação de $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ZnCl_2 e $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ anterior à semeadura da aveia preta, em doses a partir de 60 mg kg^{-1} de Zn associadas com 30 mg kg^{-1} de Cu resultaram em toxidez para a espécie (TIECHER et al., 2016).

3.3 Cultivo de plantas estivais na região Sul do Brasil

As espécies forrageiras de inverno são extremamente importantes para a conservação do solo (como planta de cobertura), para a produtividade de lavouras de grãos (em sistemas de rotação) e manutenção da sustentabilidade da atividade pecuária na região Sul do Brasil. O manejo adequado das culturas promove a ciclagem de nutrientes, a formação de palhada e

massa de raízes que estruturam e protegem o solo. Também são fontes dietéticas de baixo custo para a alimentação animal.

Os Estados do Paraná e do Rio Grande do Sul são referências nos cultivos anuais de inverno para grãos, ensilagem, fenação e pastejo. A época de semeadura varia de acordo com a espécie e a região. Até agosto de 2020, 1289,3 mil hectares do território paranaense foram destinados aos cultivos de aveia, centeio, cevada, trigo e triticale para produção de grãos (CONAB, 2020).

Comparando os sistemas de semeadura, Veiga, Balbinot Junior e Oliveira (2014) observaram que em semeadura direta, embora o intervalo entre chuvas tenha forte influência sobre os atributos físicos do solo, a pastagem elevou os níveis de condutividade hidráulica e reduziu a densidade do solo.

Balbinot Junior et al. (2011), ao avaliarem distintas formas de uso do solo, concluíram que o consórcio entre forrageiras proporciona maior volume de biomassa e potencializa acúmulo de carbono orgânico na camada superficial do solo. Para Ziech et al. (2015), consórcios nos quais predominam gramíneas oferecem altas taxas de cobertura nos primeiros 50 dias após o manejo, devido à quantidade elevada de massa seca produzida. Descalzi et al. (2020), ao avaliarem diferentes métodos de recuperação de pastagens degradadas em regiões temperadas, observaram que a adubação sem revolvimento do solo proporciona aumento na massa de forragem anual mesmo em áreas pastejadas por ovelhas.

3.3.1 Aveia preta

A aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) é uma gramínea Magnoliophyta, classificada como Liliopsida, pertence a ordem Cyperales, da família da Poaceae e tribo Avenae. Possui raízes fibrosas seminais e adventícias. Seus colmos eretos cilíndricos com nós sólidos e entrenós densos até o período de enchimento de grãos. Após a maturação, seus colmos se tornam ocos (CASTRO; COSTA; FERRARI NETO, 2012). Difere da aveia branca (*Avena sativa* L.) por sua rusticidade, colmos mais espessos e folhas mais largas (BALL et al., 2016).

Na região sul do Brasil, a aveia preta é uma alternativa para cobrir o vazio forrageiro no período de transição outono-inverno. Selecionada a partir de populações de *Avena sativa*, a *Avena strigosa* é uma espécie bem adaptada às condições climáticas e ao solo do Paraná (IAPAR, 2020). Essa forrageira apresenta alto teor nutricional, baixo custo de produção e versatilidade de uso (MEINERZ et al., 2015).

A IAPAR 61 é uma das principais cultivares de aveia preta recomendadas para o Estado do Paraná. De ciclo tardio, destaca-se das demais por suas diferentes formas de uso. Ela pode ser pastejada diretamente no campo, servida verde no cocho, enfenada ou ensilada. Também está apta a formar cobertura de solo por seu alto potencial de produção de biomassa. Como forragem, chega a produzir cerca de 5 kg ha⁻¹ de massa seca no quinto corte, e quase 9 kg ha⁻¹ como cobertura. Embora seja suscetível à ferrugem, a incidência da doença afeta apenas a produção de grãos (IAPAR, 2020).

Quando semeada em abril na região sudoeste do Estado do Paraná, Soares, Pin e Possenti (2013) relataram que a aveia apresentou maior teor de proteína bruta que o azevém comum e o trigo forrageiro. Além disso, o valor de nutriente digestível total foi maior para as plantas semeadas em início de abril.

Segundo Soares, Pin e Possenti (2013), a aveia preta IAPAR 61 apresenta 70% de nutrientes digestíveis totais (NDT) quando semeada em abril, reduzindo até 62% com semeaduras mais tardias em junho. Ademais, os autores relataram o acúmulo de 30 g kg⁻¹ de N, 39 g kg⁻¹ de K e 4 g kg⁻¹ de P, 40 g kg⁻¹ Ca e 56 mg kg⁻¹ Zn na massa de parte aérea.

De acordo com o manual de adubação e calagem para o Estado do Paraná, na fase de emborrachamento, a aveia já extraiu 22,1 g Zn t⁻¹ de massa seca ou 3,1 g Zn t⁻¹ de massa fresca. Tais dados se assemelham aos obtidos em fenação e ensilagem (MOREIRA et al., 2019).

3.3.2 Azevém

O azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) é uma gramínea anual de inverno cultivada no sul do Brasil, tanto para cobertura de solo quanto para pastejo (PEGORARO, 2013). A planta de hábito cespitoso e altura média de 0,75 m possui colmo ereto, cilíndrico e sem pelos. Sua inflorescência é distal, ereta e atinge até 0,20 m de comprimento, com espiguetas multiflorais que apresentam flósculos e lemas aristados.

Segundo Pegoraro (2013), a época de semeadura inicia em março. Todavia, se realizada em junho, garante a oferta de forragem na primavera (FERRAZZA et al., 2013).

Forragens com maior presença de folhas na matéria seca são altamente digestíveis e impulsionam a absorção dos nutrientes (RODRIGUES et al., 2008). Nesse sentido, Skonieski et al. (2011) relataram que o azevém consorciado com aveia preta apresenta maior relação folha/colmo que em cultivos com trevo-branco ou amendoim forrageiro. O cultivo de azevém

e amendoim forrageiro consorciados com capim elefante mantêm a uniformidade da oferta de massa verde no decorrer das estações e pastejos subsequentes (OLIVO et al., 2012).

Diferente do pastejo, a adubação do azevém para produção de pré-secado objetivando 10 t ha⁻¹ exige até o triplo da dose de fertilizante. Nesse sentido, quando o teor de P no solo for alto, recomenda-se aplicar até 100 kg ha⁻¹ no sulco de semeadura. O K, por sua vez, chega a 180 kg ha⁻¹, sendo, no máximo, 80 kg ha⁻¹ no sulco de semeadura. Por fim, a dose máxima de N está em 300 kg ha⁻¹ (MOREIRA et al., 2019).

Obviamente, a produção de biomassa de parte aérea está relacionada à disponibilidade dos nutrientes e da capacidade genética do material escolhido. Nesse contexto, dentre as cultivares de azevém Barjumbo, BarHQ, Ribeye, Willians e Potro, destaca-se esta última com 60,73% de nutrientes digestíveis totais (NDT) na fase pré-floral e alta taxa de degradação ruminal em 48 horas (NEUMANN et al., 2020).

Klahr (2019) avaliou a qualidade do pré-secado de azevém cultivar Potro e concluiu que o teor nutricional do produto é maior quando não se excede a dose 10 kg ha⁻¹ de N em cobertura na fase fenológica do perfilhamento. Com isso, é possível obter na matéria seca de azevém 345 g kg⁻¹ de carboidratos totais, 615 g kg⁻¹ nutrientes digestíveis totais, 209 g kg⁻¹ de hemicelulose, 317 g kg⁻¹ de celulose, 516 g kg⁻¹ de fibra em detergente neutro (FDN) e 380 g kg⁻¹ de fibra em detergente ácido (FDA).

Quando bem adubada, a cultura apresenta teor nutricional e capacidade de lotação elevados (DIFANTE et al., 2006). Assim, o fornecimento dessa gramínea junto de suplementos a bezerros proporciona aumento no ganho de peso vivo (ROSO et al., 2009). Pötter et al (2010) observaram que a nutrição de novilhas com azevém e suplemento concentrado teve efeito positivo sobre o escore de condição corporal, altura de cernelha e peso, adiantando o início do acasalamento. Roso et al. (2016) relataram maior ganho médio diário em novilhas de corte que pastejaram azevém suplementado com gordura extrusada do que naquelas que consumiram somente a forragem.

3.3.3 Centeio

O centeio é classificado como Liliopsida, da ordem Cyperales, pertencente à família Poaceae, subfamília Pooideae, tribo Triticeae, espécie *Secale cereale* L. (BAIER, 1996). É uma planta rústica com raízes profundas que aumentam a capacidade de absorção de água e nutrientes, permitindo tolerar o déficit hídrico (CAMARGO; FERREIRA FILHO; FREITAS,

1998). Somada a isso, sua elevada capacidade de perfilhamento proporciona alto volume de massa verde para cobertura de solo e pastejo (MIEDANER et al., 2018).

Implantado no sul do Brasil pelos imigrantes europeus, o cereal faz parte da cultura regional. Os estados do Paraná e Rio Grande do Sul são os maiores produtores do grão que servem tanto para alimentação humana quanto animal. Em 2020, o Paraná destinou 3,2 mil hectares ao cultivo de centeio (CONAB, 2020).

Além da produção de grãos, o cultivo de centeio é útil à conservação do solo, sendo cobertura no inverno. Nesse contexto, Bittencourt et al (2012) observaram que o percentual de cobertura de solo dessa cultura aos 60 dias após semeadura (DAS) é superior aos de azevém, aveia e seus consórcios com ervilhaca e nabo. Já a biomassa residual da cultura cobre o solo, impedindo a passagem de luz, suprimindo germinação e emergência de plantas daninhas em cultivos de verão.

Outro aspecto favorável dessa espécie é seu potencial forrageiro no inverno, à exemplo das cultivares BRS Temprano e BRS Progresso, ambas com duplo propósito. A primeira foi lançada no mercado em 2005 pela Embrapa, já a segunda passou a ser comercializada no ano de 2013 (NASCIMENTO JÚNIOR, 2015).

O centeio cultivar BRS Temprano já é comum aos produtores sulistas, sendo que sua época de semeadura se estende de meados de março até fim de julho. O ciclo de 135 dias possibilita até cinco cortes, sendo o primeiro aos 45 dias após a emergência. A composição de 23% de proteína bruta e 59% de fibra insolúvel em detergente neutro reflete em qualidade nutricional e produção de biomassa superiores às aveias preta e branca, além de ser resistente à geada (NUSSED, 2020).

3.4 Referências Bibliográficas

ALLOWAY, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 31, n. 5, p. 537–548, 1 out. 2009.

AMBROSINI, V. G. et al. Impacto do excesso de cobre e zinco no solo sobre videiras e plantas de cobertura. In: **Calagem, adubação e contaminação em solos cultivados com videiras**. Bento Gonçalves, RS: Embrapa uva e Vinho, 2016. p. 91–110.

ARANI, A. B.; NAMDARI, A.; NAZARLI, H. Wheat Grain Enrichment with Zinc Through Using Zinc Fertiliser and Preceding Plant Residues Incorporation. **Agriculture (Pol'nohospodárstvo)**, v. 64, n. 2, p. 80–86, 1 jun. 2018.

- BAIER, A. C. **Centeio**. Portal Embrapa - CNPT, , 1996. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/849789/centeio>>. Acesso em: 24 ago. 2020
- BALBINOT JUNIOR, A. A. et al. Winter pasture and cover crops and their effects on soil and summer grain crops. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1357–1363, out. 2011.
- BALL, T. B. et al. Morphometric analysis of phytoliths: recommendations towards standardization from the International Committee for Phytolith Morphometrics. **Journal of Archaeological Science**, p. 106–111, 1 abr. 2016.
- BEZERRA, T. A. et al. Insegurança alimentar no Brasil segundo diferentes cenários sociodemográficos. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 2, p. 637–651, fev. 2017.
- BIESALSKI, H. K. Hidden Hunger. In: **Hidden Hunger**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2013a.
- BIESALSKI, H. K. Quality Comes with a Price Tag: The Deadly Triangle of Economics, Hunger, and Child Development. In: **Hidden Hunger**. Berlin: Springer, 2013b. p. 131–192.
- BIOFORT. **Rede BioFORT**. Disponível em: <<https://biofort.com.br/rede-biofort/>>. Acesso em: 13 set. 2020.
- BITTENCOURT, H. VON H. et al. **Efeito da adição de resíduos provenientes de culturas de cobertura de inverno na emergência de plantas espontâneas de verão**. . In: II CONGRESSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA UTFPR. 2012.
- BLASCO, B.; NAVARRO-LEÓN, E.; RUIZ, J. M. **Plant Micronutrient Use Efficiency**. [s.l.] Elsevier, 2018.
- CAMARGO, C. E. DE O.; FERREIRA FILHO, A. W. P.; FREITAS, J. G. DE. Avaliação de genótipos de centeio, triticale, trigo comum e trigo duro quanto à tolerância ao alumínio em solução nutritiva. **Scientia Agrícola**, v. 55, n. 2, p. 227–232, maio 1998.
- CASTRO, G. S. A.; COSTA, C. H. M.; FERRARI NETO, J. Ecofisiologia da Aveia Branca. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 11, n. 3, p. 1–15, 30 set. 2012.
- CHASAPIS, C. et al. Zinc and human health: an update. **Archives of Toxicology**, v. 86, n. 4, p. 521–534, abr. 2012.
- CHEN, W. et al. Differential changes in photosynthetic capacity, 77 K chlorophyll fluorescence and chloroplast ultrastructure between Zn-efficient and Zn-inefficient rice genotypes (*Oryza sativa*) under low zinc stress. **Physiologia Plantarum**, v. 132, n. 1, p. 89–101, 2008.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos - Décimo primeiro levantamento**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

DESCALZI, C. A. et al. Pasture restoration improvement methods for temperate degraded pastures and consequences of the climatic seasonality on soil–pasture complex. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 206, n. 1, p. 130–147, 1 fev. 2020.

DHIR, B.; SHARMILA, P.; SARADHI, P. P. Photosynthetic performance of *Salvinia natans* exposed to chromium and zinc rich wastewater. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, v. 20, n. 1, p. 61–70, mar. 2008.

DIFANTE, G. DOS S. et al. Produção de novilhos de corte com suplementação em pastagem de azevém submetida a doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 35, n. 3, p. 1107–1113, jun. 2006.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS et al. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2020**. Roma: FAO, 2020.

FERRAZZA, J. M. et al. Production of annual winter forages at different sowing times. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 379–389, jun. 2013.

FERREIRA, K. S. et al. Concentrações de selênio em alimentos consumidos no Brasil. **Revista Panamericana de Salud Pública**, v. 11, n. 3, mar. 2002.

GALYEAN, M. L.; PERINO, L. J.; DUFF, G. C. Interaction of cattle health/immunity and nutrition. **Journal of Animal Science**, v. 77, n. 5, p. 1120–1134, maio 1999.

GIROTTI, E. et al. Triggered antioxidant defense mechanism in maize grown in soil with accumulation of Cu and Zn due to intensive application of pig slurry. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 93, p. 145–155, 1 jul. 2013.

GRAHAM, R. D. et al. Nutritious subsistence food systems. **Advances in Agronomy**, v. 92, p. 1–74, 2007.

HARVESTPLUS. **HarvestPlus - Our History**. Disponível em: <<https://www.harvestplus.org/about/our-history>>. Acesso em: 13 set. 2020a.

HARVESTPLUS. **Biofortified Crops Around the World**, 2020b. Disponível em: <<https://www.harvestplus.org/sites/default/files/Biofortified%20Crops%20Around%20the%20World.pdf>>

HARVESTPLUS. **Nutrição - Zinco**. Disponível em: <<https://www.harvestplus.org/content/what-we-do>>. Acesso em: 4 set. 2020c.

IAPAR - INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Aveia preta Cultivares Comercializadas** IAPAR, , 2020. Disponível em: <<http://www.iapar.br/pagina-1967.html>>. Acesso em: 24 ago. 2020

INSTITUTE OF MEDICINE et al. **Dietary Reference Intakes for Vitamin C, Vitamin E,**

KLAHR, G. T. **Valor nutricional de pré-secados de azevém potro sob diferentes estratégias de adubação e etapas de produção**. 60 p. Universidade Federal do Pampa, Campus Uruguaiana, Uruguaiana, 2019.

KOURY, J. C.; DONANGELO, C. M. Zinco, estresse oxidativo e atividade física. **Revista de Nutrição**, v. 16, n. 4, p. 433–441, dez. 2003.

LI, S. et al. Rice zinc finger protein DST enhances grain production through controlling Gn1a/OsCKX2 expression. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 8, p. 3167–3172, 19 fev. 2013.

MAFRA, D.; COZZOLINO, S. M. F. The importance of zinc in human nutrition. **Revista de Nutrição**, v. 17, n. 1, p. 79–87, mar. 2004.

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

MEINERZ, G. R. et al. Utilização da biomassa remanescente de pastagens de estação fria para produção de forragem conservada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 67, n. 5, p. 1390–1398, out. 2015.

MIEDANER, T. et al. Dynamic quantitative trait loci (QTL) for plant height predict biomass yield in hybrid rye (*Secale cereale* L.). **Biomass and Bioenergy**, v. 115, p. 10–18, 1 ago. 2018.

MONDARDO, D. et al. Produção e composição químico-bromatológica da aveia preta fertilizada com doses crescentes de dejetos líquidos suínos. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 509–517, jun. 2011.

MOREIRA, A. et al. **Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (2ª Edição)**. 2. ed. Curitiba: Núcleo Estadual Paraná da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - NEPAR-SBCS, 2019.

MURGIA, I.; DE GARA, L.; GRUSAK, M. A. Biofortification: how can we exploit plant science and biotechnology to reduce micronutrient deficiencies? **Frontiers in Plant Science**, v. 4, 2013.

NASCIMENTO JÚNIOR, A. DO. **Centeio BRS Progresso** Embrapa, , fev. 2015. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/121608/1/FD-0385.pdf>>

NEUMANN, M. et al. Fiber composition and digestibility of fodder in different ryegrass fields submitted to different harvesting management systems. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, n. 4, p. 1535–1544, ago. 2020.

NUSSED. **Sementes de Centeio Temprano - Nuseed Brasil**. Disponível em: <<https://nuseed.com/br/product/centeio-temprano/>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

NUTTI, M. R. **A história dos Projetos HarvestPlus, AgroSalud e BioFORT no Brasil**. Embrapa Agroindústria de Alimentos-Artigo em anais de congresso (ALICE). **Anais...** In: IV

REUNIÃO DE BIOFORTIFICAÇÃO NO BRASIL. Teresina, PI: Embrapa Meio Norte, 2011.

OLIVER, S.; BARBER, S. A. Mechanisms for the Movement of Mn, Fe, B, Cu, Zn, Al and Sr from One Soil to the Surface of Soybean Roots (*Glycine max*). **Soil Science Society of America Journal**, v. 30, n. 4, p. 468–470, 1 jul. 1966.

OLIVO, C. J. et al. Produtividade e valor nutritivo de pastos consorciados com diferentes espécies de leguminosas. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 2051–2058, nov. 2012.

PEDRAZA, D. F. et al. Estudos realizados no Brasil sobre a deficiência e a suplementação de zinco: ênfase em crianças. **Revista Brasileira de Saúde Materno Infantil**, v. 17, n. 2, p. 217–232, jun. 2017.

PEGORARO, L. M. C. **Noções sobre a produção de leite**, 2013. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/clima-temperado/forrageiras>>. Acesso em: 24 ago. 2020

PICCOLO, M. B. et al. Preweaning injections of bovine ST enhanced reproductive performance of *Bos indicus*-influenced replacement beef heifers. **Journal of Animal Science**, v. 96, n. 2, p. 618–631, 6 mar. 2018.

PÖTTER, L. et al. Suplementação com concentrado para novilhas de corte mantidas em pastagens cultivadas de estação fria. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 39, n. 5, p. 992–1001, maio 2010.

PRASAD, A. S. Zinc: An antioxidant and anti-inflammatory agent: Role of zinc in degenerative disorders of aging. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v. 28, n. 4, p. 364–371, 2014.

RAIJ, B. VAN et al. **Recomendações da adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1996. p. 285.

RODRIGUES, R. C. et al. Produção de massa seca, relação folha/colmo e alguns índices de crescimento do *Brachiaria brizantha* cv. Xaraés cultivado com a combinação de doses de nitrogênio e potássio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 37, n. 3, p. 394–400, mar. 2008.

ROSO, D. et al. Alternatives of utilization of Italian ryegrass pasture for rearing of beef heifers. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. 2, p. 240–248, fev. 2009.

ROSO, D. et al. Performance of beef heifers supplemented with extruded fat on italian ryegrass pasture. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 38, n. 3, p. 311–317, 8 ago. 2016.

ROSSI, L. et al. Reduced Growth and Skeletal Changes in Zinc-Deficient Growing Rats Are Due to Impaired Growth Plate Activity and Inanition. **The Journal of Nutrition**, v. 131, n. 4, p. 1142–1146, 1 abr. 2001.

RUGELES-REYES, S. M. et al. Foliar application of zinc in the agronomic biofortification of arugula. **Food Science and Technology**, v. 39, n. 4, p. 1011–1017, dez. 2019.

SKONIESKI, F. R. et al. Composição botânica e estrutural e valor nutricional de pastagens de azevém consorciadas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, n. 3, p. 550–556, mar. 2011.

SOARES, A. B.; PIN, E. A.; POSSENTI, J. C. Valor nutritivo de plantas forrageiras anuais de inverno em quatro épocas de semeadura. **Ciência Rural**, v. 43, n. 1, p. 120–125, jan. 2013.

STEIN, J. V. M. A. J.; BHUTTA, Z. A. **Analyzing the Health Benefits of Biofortified Staple Crops by Means of the Disability-Adjusted Life Years Approach: a Handbook Focusing on Iron, Zinc and Vitamin A**. 2005.

SUBBAIAH, L. V. et al. **Novel Effects of Nanoparticulate Delivery of Zinc on Growth, Productivity, and Zinc Biofortification in Maize (Zea mays L.)**. research-article. Disponível em: <<https://pubs-acsc.org.ez132.periodicos.capes.gov.br/doi/full/10.1021/acs.jafc.6b00838>>. Acesso em: 29 ago. 2020.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: [s.n.].

TIECHER, T. L. et al. Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 253–263, set. 2016.

VALLE, S. DE F. et al. Deficiências minerais em gado de corte no sul do Brasil. **Brazilian Journal of Veterinary Research and Animal Science**, v. 40, n. supl., 1 jan. 2003.

VEIGA, M. DA; BALBINOT JUNIOR, A. A.; OLIVEIRA, D. A. DE. Formas de semeadura de pastagem anual de inverno e intervalos entre pastejos influenciando atributos físicos do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5spe, p. 896–905, 2014.

VELOSO, C. A. C. et al. Effect of manganese on mineral nutrition and growth of black pepper (*Piper nigrum*, L.). **Scientia Agricola**, v. 52, n. 2, p. 376–383, ago. 1995.

WHITE, P. J.; BROADLEY, M. R. Physiological Limits to Zinc Biofortification of Edible Crops. **Frontiers in Plant Science**, v. 2, 2011.

WHITE, P. J.; BROWN, P. H. Plant nutrition for sustainable development and global health. **Annals of Botany**, v. 105, n. 7, p. 1073–1080, 1 jun. 2010.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Environmental Health Criteria 221**.

Disponível em: <<http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc221.htm#1.5.1>>. Acesso em: 11 set. 2020.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Whats is hidden hunger?** Disponível em: <https://www.who.int/nutrition/topics/WHO_FAO_ICN2_videos_hiddenhunger/en/>. Acesso em: 13 set. 2020.

ZIECH, A. R. D. et al. Proteção do solo por plantas de cobertura de ciclo hibernar na região Sul do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 50, n. 5, p. 374–382, maio 2015.

4 BIOFORTIFICAÇÃO DE ZINCO E ACÚMULO DE NUTRIENTES EM FORRAGEIRAS DE INVERNO

4.1 Resumo

O zinco (Zn) é um elemento essencial para as plantas e mamíferos e é considerado um dos nutrientes mais deficiente na população mundial. Esse trabalho objetivou-se estudar os efeitos da adubação de Zn no solo e via foliar sobre a produção de biomassa e teores e exportações de Zn e demais nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn e Cu) em cultivos de azevém, centeio e aveia preta. Para cada forrageira, o delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com quatro repetições, sob esquema de parcela subdividida. Nas parcelas experimentais estudou-se o fornecimento de Zn na adubação de sementeira e nas subparcelas experimentais avaliou-se a aplicação de doses e épocas de pulverizações foliares de Zn. As produções de biomassa das três forrageiras não foram afetadas com os tratamentos. A adubação foliar de Zn realizada na época mais tardia foi a forma mais eficiente em biofortificar a biomassa das forrageiras com o micronutriente. Quanto aos demais nutrientes, a adubação de Zn no solo elevou os teores e a exportações de N, Ca e Fe e reduziu o de Cu nas três forrageiras, mostrando a forte influência da disponibilidade de Zn^{2+} no solo sobre a absorção radicular desses nutrientes. Ainda, em pelo menos uma das três espécies forrageiras estudadas, a adição de Zn no solo também aumentou a absorção de P, Mg, S e reduziu a de Mn. Conclui-se que a adubação de Zn no solo e, especialmente, via foliar aumenta o teor do micronutriente na biomassa das forrageiras. A adubação de Zn no solo também tem efeitos na absorção dos demais nutrientes do solo, especialmente sobre os macronutrientes N e Ca e os micronutrientes Fe e Cu.

Palavras-chave: *Lolium multiflorum*, *Secale cereale*, *Avena strigosa*, micronutriente, nutrição animal.

4.2 Abstract

Zinc (Zn) is an essential element for plants and mammals and is considered one of the most deficient nutrients in the world population. The objective of this work was to study the effects of Zn fertilization in soil and leaves on biomass yield and concentrations and exports of Zn and other nutrients (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn and Cu) in ryegrass, rye and black oat crops. For each winter forage species, the experimental design was in randomized blocks, with four replications, in a split-plot design. In the main plots, the supply of Zn in the sowing

fertilization was studied, and in the subplots, the doses and times of foliar spraying of Zn were evaluated. The biomass yields of the three winter forage species were not affected by the Zn application treatments. Foliar fertilization of Zn performed at the later time was the most efficient way to biofortify the forage species biomass with the micronutrient. As for the other nutrients, the soil fertilization of Zn increased the levels and exports of N, Ca and Fe, and reduced the level and export Cu in the three forage species, showing the strong influence of the Zn²⁺ availability in the soil on the uptake of these nutrients. In addition, in at least one of the studied winter forage species, the soil fertilization of Zn also increased the uptake of P, Mg, S and reduced the uptake of Mn. It is concluded that the soil fertilization of Zn and, especially, foliar fertilization of Zn increases the Zn content in the forage species biomass. The soil fertilization of Zn also has effects on the uptake of other nutrients by forage species from the soil, especially on the macronutrients N and Ca and the micronutrients Fe and Cu.

Keywords: *Lolium multiflorum*, *Secale cereale*, *Avena strigosa*, micronutrient, animal nutrition.

4.3 Introdução

A pecuária brasileira é uma das mais consolidadas do mundo. De acordo com dados da Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, o rebanho bovino brasileiro é de aproximadamente 214,7 milhões de cabeças, sendo o Estado do Paraná responsável por 4,41% deste rebanho (ABIEC, 2019). Segundo Souza et al. (2013), a carne bovina é o quinto alimento com maior prevalência de consumo pela população brasileira, e os produtos lácteos também representam valores expressivos na dieta da população.

O zinco (Zn) é um elemento químico considerado essencial para os animais, plantas e microrganismos. Ele desempenha importante função na atividade enzimática, e é componente de várias proteínas (PEREIRA et al., 2011; ANDREINI et al., 2006), atuando na regulação da transcrição gênica, níveis hormonais, síntese de DNA e proteínas e no metabolismo energético (NISHI, 1996).

O Zn é o micronutriente mais deficiente em solos do Brasil que pode afetar negativamente a produção vegetal e acúmulo desse micronutriente na biomassa vegetal. Nas plantas, o Zn atua na ativação de enzimas, regulação e expressão gênica, síntese de proteínas, metabolismo de carboidratos, fotossíntese, atuação de fito-hormônios, fertilidade, regulação

de crescimento, produção de sementes e na defesa contra doenças (MARSCHNER, 2012; SADEGHZADEH, 2013).

Nos seres humanos, a deficiência nutricional de Zn é um problema a nível mundial, atingindo boa parte da população, em especial as de baixa renda (PEREIRA et al., 2011; WELCH, 2005). Estima-se que cerca de um terço da população mundial apresenta deficiência deste micronutriente (MACEDO, 2009)EZZATI et al., 2004).

O Zn está entre os elementos mais abundantes no organismo animal, regulando o sistema imune, sendo cofator de crescimento, antioxidante, anti-inflamatório e responsável pela homeostase epitelial. Entretanto, o corpo não é capaz de armazená-lo, sendo necessária a ingestão de doses diárias para o funcionamento ideal do metabolismo (ZALEWSKI et al., 2005). Em bovinos, por exemplo, a deficiência de Zn pode promover redução no desempenho, afetando negativamente a produção de leite e carne, baixando a imunidade e a fertilidade, promovendo paraqueratose e dificultando a cicatrização de ferimentos (DANTAS; NEGRÃO, 2010). Faz-se necessária, portanto, a inclusão de Zn na dieta animal, sendo com suplemento mineral ou através da biofortificação dos alimentos volumosos, tais quais as forrageiras de inverno.

Na região sul do Brasil o sistema de integração lavoura pecuária (ILP) apresenta grande relevância para a intensificação no uso de áreas agrícolas, garantindo uma exploração mais sustentável. Neste contexto, a utilização de espécies forrageiras de inverno é fundamental para garantir o sucesso do sistema, substituindo o pousio, colaborando com a qualidade do solo, produzindo palhada para suprimir a emergência de plantas daninhas em cultivos seguintes e até elevando a produtividade de culturas de verão como a soja (BATISTA et al., 2020; NASCIMENTO et al., 2021).

Os estados da região Sul do Brasil possuem clima ameno, a exemplo do Paraná, com temperatura média variando entre 11 e 19 °C, adequado ao exigido pelas forrageiras estivais para seu ótimo crescimento, de 18 a 23 °C (MORAES, 1995). A região apresenta potencial a ser explorado na produção de alimentos conservados de aveia preta e azevém (Ferraza et al. 2013).

Por se tratar de alimentos para bovinos, caprinos e ovinos, forrageiras com maior teor de Zn na biomassa podem elevar a concentração desse micronutriente no plasma sanguíneo dos animais, podendo melhorar o desempenho na produção de carne e leite e elevar as

concentrações de Zn nos produtos originários destes animais, que serão posteriormente destinados ao consumo humano.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi estudar os efeitos da aplicação de Zn no solo e via pulverizações foliares sobre a produção e concentração de Zn na forragem e sobre a exportações de nutrientes da área de cultivo em três espécies forrageiras de inverno: azevém (*Lolium multiflorum* Lam.), centeio (*Secale cereale* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.).

4.4 Material e Métodos

4.4.1 Área experimental, instalação e condução do experimento

A área experimental como um todo possuiu dimensões de 60 x 60 m (3600 m²), relevo relativamente plano e o solo foi classificado como Latossolo Bruno de textura muito argilosa (MICHALOVICZ et al., 2019). Localizou-se no Campo Experimental do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual do Centro-Oeste (UNICENTRO), em Guarapuava, Estado do Paraná, Brasil. O município de Guarapuava está situado na zona subtropical do Estado do Paraná (MAACK, 2012).

O tipo climático predominante na região é temperado de altitude - Cfb, segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresentando temperatura média menor que 18 °C no mês mais frio (mesotérmico), verões amenos, temperatura média no mês mais quente inferior a 22 °C, sem estação seca definida e com geadas severas (DUBREUIL et al., 2018). A altitude da área experimental é de aproximadamente 1041 metros acima do nível do mar, e as coordenadas geográficas são: 25° 23'26" S e 51° 27'15" W.

Os dados de precipitação pluviométrica acumulada e temperatura média registrada durante o período experimental (entre 28/05/2018 a 06/11/2018) foram obtidos na estação meteorológica do Instituto Agrônômico do Paraná (localizada a 25°23'2"S 51°29'43"W e 1.026 m altitude), situada a aproximadamente 50 m da área experimental (Figura 1).

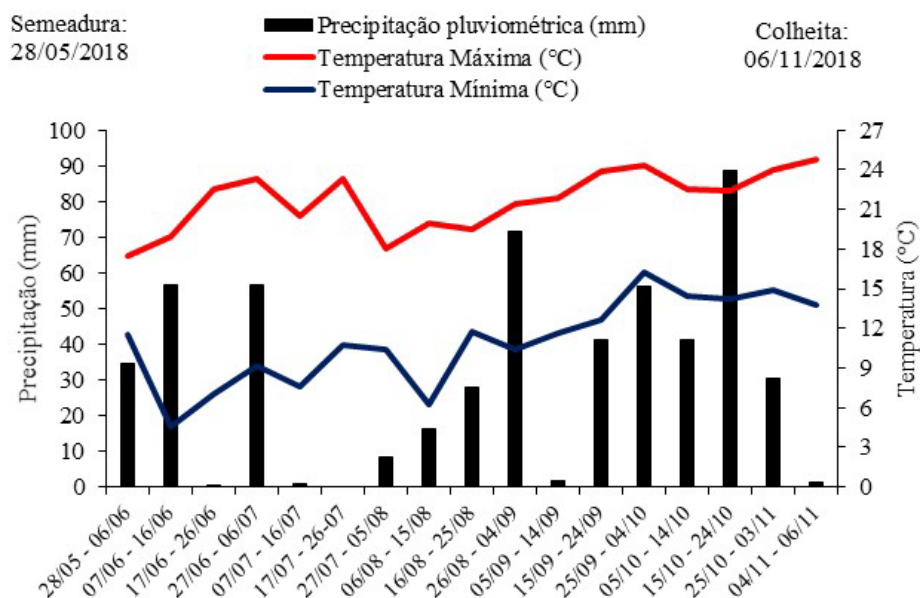


Figura 1. Valores decêndios de precipitação pluviométrica e temperatura máxima e mínima no campo experimental durante o período de condução dos experimentos com as três espécies forrageiras de inverno (entre 28 de maio a 06 de novembro de 2018) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fonte: Estação Meteorológica da Rede do Instituto Agrônomo do Estado do Paraná.

Previamente a instalação do experimento foi feita amostragens de solo, considerando a camada de 0-20 cm de profundidade, e as análises químicas dessas amostras foram realizadas no laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas do *Campus* Cedeteg da UNICENTRO, localizado na cidade de Guarapuava, Estado do Paraná, conforme a metodologia oficial de Análise Química de Solo para o Estado do Paraná (PAVAN et al., 1992; SILVA, 2009). Os resultados da análise química do solo obtidos antes da instalação do experimento estão descritos na tabela 1.

Tabela 1. Resultados da análise química do solo da área experimental em amostra composta da camada de 0-20 cm de profundidade (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

pH	P-Mehlich	S-SO ₄ ²⁻	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al
---CaCl ₂ ---	-----mg dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----cmol _c dm ⁻³ -----
5,01	1,32	8,46	0,06	5,79	1,96	0,09	6,74
CTC (pH 7)	V	MO	Zn	Fe	Mn	Cu	
---cmol _c dm ⁻³ ---	---%---	---g kg ⁻¹ ---	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----	-----mg dm ⁻³ -----
14,55	53,68	48,95	3,15	78,86	54,53	3,04	

Fonte: Laboratório de Solos e Nutrição Mineral de Plantas – Unicentro, *Campus* Cedeteg, localizado em Guarapuava-PR.

A cultura que antecedeu a semeadura das forrageiras de inverno foi o feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivado sob sistema de plantio direto, na safra de verão 2017/2018. A semeadura das três espécies forrageiras de inverno, azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) cv. Potro, centeio (*Secale cereale* L.) cv. Temprano e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.) cv. IAPAR-61, foram realizadas no mesmo dia na área experimental. O espaçamento entrelinhas adotado para as três espécies foi de 17 cm com diferentes densidades de semente, utilizando-se 40 kg ha⁻¹ de sementes para o azevém, 40 kg ha⁻¹ de sementes para o centeio e 80 kg ha⁻¹ de sementes para a aveia preta. Os controles de plantas daninhas, pragas e doenças foram feitas conforme recomendações técnicas para o manejo das culturas na região.

4.4.2 Delineamento experimental, tratamentos e avaliações

Para cada espécie forrageira (azevém, centeio e aveia preta), o delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso (DBC) com quatro repetições, em esquema de parcela subdividida no espaço. Nas parcelas foi estudado o fator “adubação de Zn no solo”, composto por dois tratamentos, e nas subparcelas foi estudado o fator “adubação de Zn via pulverizações foliares”, composto por seis tratamentos. Cada subparcela experimental foi constituída por 13 linhas de plantas (espaçadas em 17 cm) e 5 m de comprimento cada, com área de 11,05 m². Assim, para cada espécie forrageira, o experimento teve 48 subparcelas experimentais (2 tratamentos de Zn no solo x 6 tratamentos de Zn via foliar x 4 repetições), ocupando a área de 530,40 m². Considerando as três espécies forrageiras, a área total para os três experimentos foi 1.591,20 m².

As parcelas experimentais consistiram de dois tratamentos de adubação de zinco (Zn) no solo (0 e 4 kg ha⁻¹ de Zn), utilizando-se dois tipos de formulados NPK, o 12-27-06 e o 12-27-06+Zn (1%), e aplicados no sulco de semeadura na dosagem de 400 kg ha⁻¹, fornecendo para todos os tratamentos a dose de 48, 108, 24 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, e mais 4 kg ha⁻¹ de Zn para os tratamentos que receberam o adubo contendo o micronutriente.

As subparcelas experimentais foram compostas de seis tratamentos fornecidos via pulverizações foliares, associando-se doses de Zn (400 e 800 g ha⁻¹ de Zn via foliar), épocas e número de pulverização (uma ou duas pulverizações na época-1 e/ou época-2), além de um tratamento que não recebeu adubação foliar de Zn (testemunha). Dessa forma, os seis tratamentos de pulverizações foliares de Zn foram: 1) Sem pulverização foliar (testemunha); 2) Única pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1 (400-E1); 3) Única pulverização de 800

g ha⁻¹ de Zn na época-1 (800-E1); 4) Única pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2 (400-E2); 5) Única pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2 (800-E2); e 6) Duas pulverizações, uma de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1 e outra de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2 (400-E1+E2). A calda de pulverização foliar foi preparada usando como fonte de Zn o sulfato de Zn (ZnSO₄.7H₂O p.a.) da marca Merck® e óleo mineral como adjuvante. As aplicações foliares foram realizadas por meio de pulverizador costal, com vazão de calda de 160 L ha⁻¹.

A tabela 2 apresenta um resumo dos tratamentos de adubação de Zn aplicados em cada espécie forrageira estudada.

Tabela 2. Descrição dos 12 tratamentos de adubação de Zn aplicados nas três espécies forrageiras de inverno: azevém, centeio e aveia preta (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Tratamentos de adubação de Zn no solo	Tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares			
	Dose de Zn aplicada por pulverização foliar	Número de pulverização realizada	Época de realização da pulverização*	Abreviação do tratamento foliar
Sem Zn no solo	Sem pulverização	-	-	TEST
	400 g ha ⁻¹	1	Época-1	400-E1
	800 g ha ⁻¹	1	Época-1	800-E1
	400 g ha ⁻¹	1	Época-2	400-E2
	800 g ha ⁻¹	1	Época-2	800-E2
	400 g ha ⁻¹	2	Época-1 e Época-2	400-E1+E2
Com Zn no solo (4 kg ha ⁻¹)	Sem pulverização	-	-	TEST
	400 g ha ⁻¹	1	Época-1	400-E1
	800 g ha ⁻¹	1	Época-1	800-E1
	400 g ha ⁻¹	1	Época-2	400-E2
	800 g ha ⁻¹	1	Época-2	800-E2
	400 g ha ⁻¹	2	Época-1 e Época-2	400-E1+E2

* Época-1 = 116 DAS para o azevém, 110 DAS para o centeio e 94 DAS para a aveia preta.

Época-2 = 145 DAS para o azevém, 145 DAS para o centeio e 121 DAS para a aveia preta.

As forrageiras estudadas apresentam distintas taxa de desenvolvimento fenológico nas diferentes fases (vegetativa, reprodutiva e maturação), considerando as condições edafoclimáticas da área e período experimental. Assim, as épocas de pulverização e o corte das forrageiras foram diferentes entre as espécies, visando maximizar, dentro do período experimental, o acúmulo de matéria seca para produção de silagem pré-secada.

Neste sentido, o azevém cv. Potro teve a menor taxa de desenvolvimento fenológico entre as forrageiras estudadas. Para esta espécie, as épocas de pulverizações foliares foram estabelecidas da seguinte maneira: única pulverização realizada aos 116 DAS (45 dias antes do corte); única pulverização realizada aos 145 DAS (16 dias antes do corte); e duas pulverizações realizadas aos 116 e 145 DAS (45 e 16 dias antes do corte, respectivamente). O

corte do azevém ocorreu aos 161 DAS, quando as plantas estavam iniciando o estágio de formação de grãos (escala 11 de Feeks-Large, - LARGE, 1954).

Para o centeio cv. Temprano, as épocas de pulverizações foliares consistiram da seguinte forma: única pulverização realizada aos 110 DAS (47 dias antes do corte); única pulverização realizada aos 145 DAS (12 dias antes do corte); e duas pulverizações realizadas aos 110 e 145 DAS (47 e 12 dias antes do corte, respectivamente). O corte do centeio ocorreu aos 157 DAS, quando as plantas estavam em estágio de formação de grãos (escala 11 de Feeks-Large - LARGE, 1954).

Para a aveia preta cv. IAPAR-61 as épocas de pulverizações foliares foram realizadas antes das outras forrageiras, conforme segue: única pulverização realizada aos 94 DAS (57 dias antes do corte); única pulverização realizada aos 121 DAS (30 dias antes do corte); e duas pulverizações realizadas aos 94 e 121 DAS (57 e 30 dias antes do corte, respectivamente). O corte da aveia preta se deu aos 151 DAS, quando as plantas se encontravam em estágio de formação de grãos (escala 11 de Feeks-Large - LARGE, 1954).

Para o corte das forrageiras, realizado em aproximadamente 156 DAS (com variações entre as espécies conforme foi supracitado), utilizou-se uma tesoura de poda, cortando-as na altura de aproximadamente 10 cm da superfície do solo. A área amostral foi obtida através de um quadro de 0,25 m². Ao todo, em cada subparcela experimental, retirou-se a parte aérea das plantas em três amostras de 0,25 m². Tais amostras foram identificadas e levadas para casa de vegetação, onde, posteriormente, foram secas em estufa de circulação forçada de ar sob temperatura de 58-60°C, até massa constante. Após a secagem, as amostras foram pesadas para a obtenção de massa seca de parte aérea e, em seguida, moídas em moinho tipo Willey.

A análise química do material vegetal foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas do *Campus* Cedeteg da UNICENTRO, conforme metodologia descrita em Silva (2009). Para a análise de N foi usada a digestão sulfúrica e para os demais nutrientes (P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Cu e Zn) foi usada a digestão nítrica-perclórica.

Para cada espécie forrageira, os dados de teores de nutrientes foram relacionados com a produção de biomassa para estimar as exportações de nutrientes da área com a colheita da parte aérea da planta (forragem), em kg ha⁻¹ para os macronutrientes e g ha⁻¹ para os micronutrientes, visando a produção de silagem pré-secada.

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (teste de F, $p \leq 0,05$), com auxílio do *software* SISVAR (FERREIRA, 2011), considerando o delineamento em blocos ao acaso (DBC), com quatro repetições, em esquema de parcela subdividida. Quando significativo, as médias foram comparadas pelo teste de LSD de Fisher ($p \leq 0,05$).

4.5 Resultados e Discussão

4.5.1 Produção de matéria seca

A análise de variância mostrou que não houve efeitos significativos ($p > 0,05$) dos tratamentos de adubação de zinco (Zn) no solo e via pulverizações foliares sobre a produtividade de biomassa de azevém, centeio e aveia preta (Tabela 3).

Tabela 3. Quadrados médios da análise de variância para peso de matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação	GL ¹	Azevém	Centeio	Aveia preta
Bloco	3	5088,2431 n.s.	1550267,1875 n.s.	2565083,5764 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1	15371428,5208 n.s.	739288,5208 n.s.	890802,5208 n.s.
Resíduo 1	3	2426684,2431	247174,8542	816811,3542
Zn-Foliar (Zn-F)	5	2670040,6375 n.s.	510748,0708 n.s.	998386,9708 n.s.
Zn-S × Zn-F	5	2081616,1708 n.s.	750725,6708 n.s.	998587,5708 n.s.
Resíduo 2	30	1525342,4931	856685,9375	1123805,6486
CV 1 (%)		22,86	11,46	11,41
CV 2 (%)		18,13	21,33	13,38
Média		6813,94	4338,60	7920,40

¹GL = Grau de Liberdade. n.s. = $p > 0,05$, pelo teste de F.

Os valores médios de matéria seca de parte aérea foram 6814 kg ha⁻¹ para azevém cv. Potro, 4339 kg ha⁻¹ para centeio cv. Temprano e 7920 kg ha⁻¹ para aveia preta cv. IAPAR-61. Demétrio et al (2012), ao avaliarem a produção de biomassa de aveia preta cv. IAPAR-61 no município de Santa Helena-PR, obtiveram a produção de 4397 kg ha⁻¹ de matéria seca, oriundo de três cortes, com média de 1466 kg ha⁻¹ por corte, valor inferior ao obtido nesse experimento.

4.5.2 Biofortificação de Zn

Neste trabalho o foco do estudo foi o incremento do teor de Zn na biomassa das espécies forrageiras de inverno, visando a biofortificação para melhorar a qualidade nutricional da alimentação animal e humana (este com o consumo dos produtos de origem animal).

Os resultados da análise de variância mostraram que o teor de Zn na matéria seca de parte aérea do azevém e centeio foi afetado pelos efeitos isolados do fator “adubação de Zn no solo” e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares”, mas sem efeito significativo da interação entre os fatores. Contudo, o teor de Zn na matéria seca de parte aérea da aveia preta foi influenciado apenas pelo fator “adubação de Zn via pulverizações foliares”, não sendo afetado pelo fator “adubação de Zn no solo” e nem pela interação entre os fatores. O teor médio de Zn na matéria seca de parte aérea foi 58, 45 e 38 mg kg⁻¹ para o azevém, centeio e aveia preta, respectivamente, mostrando que as diferentes espécies forrageiras variam quanto à concentração de Zn nos tecidos (Tabela 4).

Tabela 4. Quadrados médios da análise de variância para teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação	GL ¹	Azevém	Centeio	Aveia preta
Bloco	3	710,9494 *	35,9571 n.s.	91,0130 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1	1087,5648 **	1227,6576 *	295,5169 n.s.
Resíduo 1	3	34,6472	72,4183	102,4229
Zn-Foliar (Zn-F)	5	8315,4006 ***	10108,4623 ***	1156,6982 ***
Zn-S × Zn-F	5	171,5340 n.s.	152,4065 n.s.	14,2245 n.s.
Resíduo 2	30	128,6584	63,9357	117,0371
CV 1 (%)		10,08	19,05	26,66
CV 2 (%)		19,42	17,90	28,50
Média		58,42	44,68	37,96

¹GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, pelo teste de F.

Verificou-se que para o azevém e centeio a aplicação de Zn no solo, exatamente no sulco de semeadura junto com a adubação NPK, aumentou significativamente o teor de Zn na biomassa de parte aérea do azevém e centeio. Esse incremento foi de 18% no azevém e de 26% no centeio. Na aveia preta também houve tendência de aumento de teor de Zn na matéria seca de parte aérea com o fornecimento de Zn no solo, mas essa variação (14%) não foi significativa ($p > 0,05$) (Figura 2).

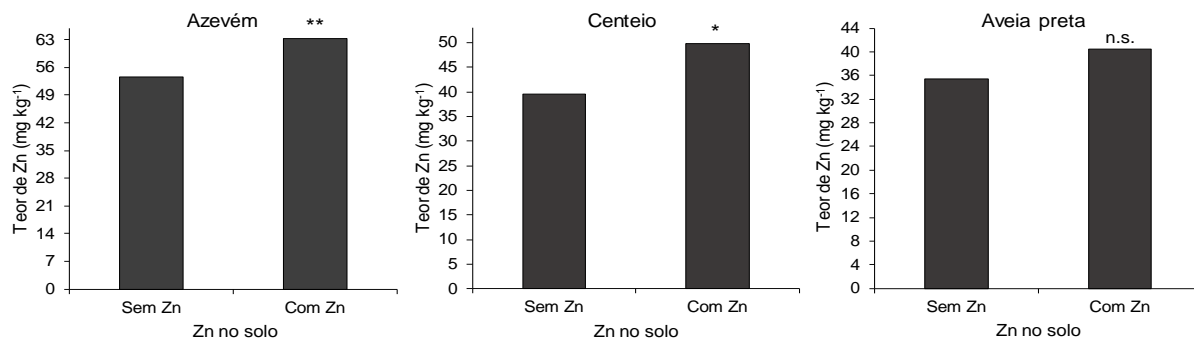


Figura 2. Teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

**, * e n.s. denotam $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente, pelo teste de F.

Assim, a aplicação de Zn no solo, durante a semeadura, teve efeito positivo no acúmulo de Zn da biomassa de parte aérea após aproximadamente 156 dias (conforme foi apresentado em Material e Métodos, o corte da parte aérea do azevém, centeio e aveia preta ocorreram aos 161, 157 e 151 DAS, respectivamente).

Considerando viabilizar o fornecimento de Zn via solo para aveia, cevada, centeio e triticale, Sher et al. (2022) avaliaram diferentes formulações de NPK+Zn e encontraram que a dose de 15 kg ha⁻¹ de ZnSO₄ proporcionou efeitos significativos sobre a produção de massa seca, aumentando o acúmulo de Zn, a proteína bruta e a fibra em detergente ácido. Contudo, em experimento de casa de vegetação, conduzido em vaso com solo, relataram-se que o fornecimento de Zn à aveia preta em Latossolo Vermelho Distrófico foi tóxico na dose de 13 mg dm⁻³ de Zn no solo, resultando na concentração de Zn na planta de 494 mg kg⁻¹. O excesso de Zn no tecido vegetal inibe o crescimento da planta, reduzindo a produção de biomassa (ABRANCHES et al., 2009). Neste sentido, considerando a textura do solo, solos arenosos e ácidos têm menor capacidade de adsorver cátions. Neste caso, embora sujeitos à lixiviação, a aplicação de Zn⁺² em excesso pode ficar disponível na solução do solo em níveis tóxicos. Em culturas como o milho, a toxidez de Zn prejudica o desenvolvimento inicial e a produção de biomassa. Por outro lado, a aplicação de Zn no solo em doses adequadas pode resultar em maior produção de biomassa vegetal conforme encontrado por Pipolo et al. (1998). Estes autores relataram que a produção de matéria seca de milho doce (cultivado em vasos com solo) foi quatro vezes maior que a testemunha com adição de 3,2 mg dm⁻³ de Zn no solo em um experimento de casa de vegetação.

Já em solos argilosos, os íons Zn^{+2} são facilmente adsorvidos aos colóides do solo. Assim, com a calagem e consequente elevação do pH, sua disponibilidade na solução do solo se reduz, o que faz necessário o fornecimento de Zn ao solo junto a adubação de base (GONÇALVES et al., 2018).

Por outro lado, em comparação com a adubação de Zn no solo, nessa pesquisa foi verificado que a adubação de Zn via pulverizações foliares teve efeito muito maior em incrementar o micronutriente na biomassa das forrageiras três espécies forrageiras (Figura 3).

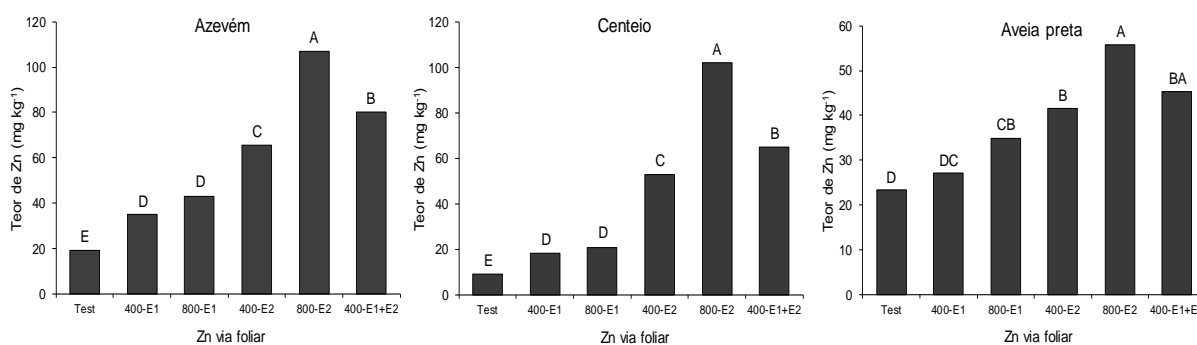


Figura 3. Teor de Zn na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Média seguida de diferente letra denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Observou-se que o tratamento testemunha (sem pulverização foliar) teve menor teor de Zn na matéria seca que os tratamentos que receberam Zn via pulverização foliar. Em comparação à testemunha, os tratamentos 400-E1, 800-E1, 400-E2, 800E2 e 400-E1+E2 aumentaram o teor de Zn, respectivamente, na magnitude de 1,8; 2,2; 3,5; 5,5 e 4,1 vezes no azevém, na magnitude de 2,0; 2,2; 5,7; 11,1 e 7,0 vezes no centeio, e na magnitude de 1,2; 1,5; 1,8; 2,4 e 1,9 vezes na aveia preta.

Considerando os resultados obtidos com a análise estatística (teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro), enfatiza-se que no azevém e centeio, a resposta de teor de Zn foi parecida, apresentando a seguinte ordem decrescente em função dos tratamentos foliares: 800E2 > 400-E1+E2 > 400E2 > 800-E1 = 400-E1 > Test. Porém, na aveia preta, essa resposta divergiu em comparação às demais forrageiras, sendo observado

que o tratamento 400E1 não modificou significativamente o teor de Zn em relação à testemunha. Na época-1, somente a maior dose (800E1) elevou o teor de Zn nessa espécie. Contudo, maiores valores de teor de Zn na aveia preta foram observados com a pulverização na época-2, sendo que a maior dose (800E2) foi superior a menor dose (400E2).

Assim, para o enriquecimento de Zn na biomassa das três forrageiras estudadas, verificou-se que a época de pulverização foliar teve maior influência em incrementar o teor de Zn na matéria seca quando comparada a dose do micronutriente fornecida em cada aplicação. Pois, a aplicação foliar de Zn na dose 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2, por exemplo, resultou em maiores valores de teor de Zn na biomassa das forrageiras que a pulverização nas doses de 400 ou 800 g ha⁻¹ na época-1. Contudo, dentro de uma mesma época de pulverização foliar, a maior dose (800 g ha⁻¹) favoreceu mais o teor de Zn que a menor dose (400 g ha⁻¹).

Assim, conclui-se que a pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época tardia (época-2) foi o tratamento mais eficiente para aumentar o teor de Zn na biomassa de azevém, centeio e aveia preta, visando o enriquecimento de Zn na forragem para a alimentação animal, por exemplo, por meio do preparo da silagem pré-secada. É importante ressaltar que esse acréscimo de teor de Zn nas forrageiras não resultou em toxidez para as plantas, pois não houve alteração significativa de produção de matéria seca, como já foi apresentado (Tabela 3). Ressalta-se ainda que os valores de produtividade de matéria seca obtidos para as três forrageiras, considerando as condições edafoclimáticas dessa pesquisa, são considerados adequados para a região de estudo (6814, 4339 e 7920 kg ha⁻¹ para o azevém, centeio e aveia preta, respectivamente).

A pulverização foliar de Zn favorece maiores concentrações desse elemento nos tecidos das plantas justamente pela capacidade do vegetal em prontamente inseri-lo em processos fisiológicos (TAIZ et al., 2017). Nesse sentido, Zoz et al. (2012) verificaram que a aplicação de 216 mg ha⁻¹ Zn induziu ao aumento de 26% no número de espigas, elevando a produtividade de grãos de trigo em 14% frente à testemunha. Resultados satisfatórios também foram relatados por Xu et al. (2022), que alcançaram um aumento 100% de Zn na massa seca de grãos de trigo, em relação à testemunha. Além disso, Moreira et al (2020) relataram que a aplicação de ZnSO₄ via foliar reduziu a severidade da brusone em trigo cultivado no Brasil.

Por fim, nesse trabalho foi mostrado que a aplicação de Zn no solo incrementou o teor de Zn na biomassa das espécies forrageiras, mas numa proporção bem menor que a pulverização foliar. Os resultados desse estudo são importantes, pois mostra-se a melhor

metodologia para biofortificar agronomicamente as forrageiras estudadas com Zn, que busca enriquecer a forragem fornecida na dieta básica dos animais por meio do fornecimento do micronutriente durante o cultivo das plantas no campo, sem prejudicar a produtividade.

A maioria dos solos onde se cultivam cereais são pobres em Zn, seja pelo material de origem do solo, textura, mineralogia, valor de potencial hidrogeniônico da solução do solo (pH), uso intensivo do solo e tipo de adubação. Em decorrência disso, relaciona-se a deficiência de Zn na população às condições da sua baixa disponibilidade nos solos. Assim, busca-se, portanto, explorar a capacidade dos vegetais em absorver e acumular Zn nas partes comestíveis por meio da adubação, seja via solo ou foliar.

Uma vez disponível nas forrageiras que serão ofertadas aos animais, o Zn passa a cumprir sua função no organismo animal como a síntese de enzimas (hidrolases e isomerasas) e de proteínas, favorecendo os sistemas imune, reprodutivo e neurológico dos animais (CAKMAK; KUTMAN, 2018; PRASAD; SHIVAY; KUMAR, 2014). Além de beneficiar a saúde dos animais, os produtos de origem animal destinados à alimentação humana, como carne, leite e derivados, passam a conter o nutriente que também é essencial ao organismo humano. Nesse contexto, haja vista que a deficiência de Zn é uma das mais importantes em países em desenvolvimento, o suprimento adequado de Zn é indispensável durante a infância, puberdade e gravidez (ROOHANI et al., 2013).

4.5.3 Teores de outros nutrientes na matéria seca

Além do teor de Zn que foi abordado no tópico anterior, neste tópico são abordados os teores dos demais nutrientes na matéria seca de parte aérea das forrageiras, em g kg^{-1} para os macronutrientes e em mg kg^{-1} para os micronutrientes.

Os resumos da análise de variância para os teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) estão apresentados na tabela 5.

Tabela 5. Quadrados médios da análise de variância para teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação		Azevém						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	67,2481 n.s.	0,1029 n.s.	141,1882 n.s.	0,5928 n.s.	0,0097 n.s.	4,7107 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	1228,1633 **	3,6410 *	4,7000 n.s.	16,8507 **	0,0999 **	16,6734 n.s.	
Resíduo 1	3	52,2958	0,3971	33,5547	0,4155	0,0042	5,3460	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	33,0682 n.s.	0,3370 n.s.	9,2653 n.s.	0,1857 n.s.	0,0020 n.s.	6,0857 *	
Zn-S × Zn-F	5	19,6676 n.s.	0,1007 n.s.	4,7686 n.s.	0,3479 n.s.	0,0025 n.s.	2,0958 n.s.	
Resíduo 2	30	23,0148	0,1649	23,1798	0,3867	0,0029	1,9725	
CV 1 (%)		19,54	12,45	18,93	19,96	4,49	18,08	
CV 2 (%)		12,96	8,02	15,74	19,25	3,75	10,98	
Média		37,01	5,06	30,60	3,23	1,44	12,79	
Fontes de Variação		Centeio						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	86,3250 *	1,2342 n.s.	2,7487 n.s.	0,7005 n.s.	0,0153 n.s.	6,8615 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	128,9696 **	2,3100 n.s.	45,1244 n.s.	5,671875 **	0,0028 n.s.	266,4919 *	
Resíduo 1	3	5,6189	1,2493	11,1763	0,1338	0,0127	28,5889	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	9,6648 n.s.	0,3040 n.s.	3,6611 n.s.	0,8888 ***	0,0618 **	4,5534 n.s.	
Zn-S × Zn-F	5	2,8679 n.s.	0,4282 n.s.	4,5157 n.s.	0,1102 n.s.	0,0060 n.s.	6,2458 n.s.	
Resíduo 2	30	8,0041	0,2456	5,0724	0,1411	0,0112	4,0489	
CV 1 (%)		9,08	19,79	17,75	19,45	7,56	36,07	
CV 2 (%)		10,83	8,78	11,96	19,97	7,11	13,57	
Média		26,12	5,65	18,83	1,88	1,49	14,82	
Fontes de Variação		Aveia preta						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	16,3699 n.s.	1,2661 n.s.	44,1856 n.s.	0,0728 n.s.	0,0053 n.s.	45,4878 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	295,8643 **	0,5547 n.s.	1,0325 n.s.	7,2618 **	0,0133 n.s.	21,7352 n.s.	
Resíduo 1	3	4,2591	0,4596	38,3852	0,2378	0,0051	7,4775	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	31,6637 n.s.	0,0785 n.s.	8,5888 n.s.	0,0796 n.s.	0,0010 n.s.	6,1289 n.s.	
Zn-S × Zn-F	5	11,7024 n.s.	0,1754 n.s.	33,5166 n.s.	0,1103 n.s.	0,0014 n.s.	3,4890 n.s.	
Resíduo 2	30	15,2198	0,7649	17,9454	0,1911	0,0021	3,1157	
CV 1 (%)		6,82	10,09	21,39	16,09	5,05	14,99	
CV 2 (%)		12,89	13,02	14,63	14,42	3,28	9,68	
Média		30,26	6,72	28,96	3,03	1,41	18,24	

¹GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, pelo teste de F.

No azevém, os teores de N, P, Ca e Mg foram afetados pelo fator “adubação de Zn no solo” e o teor de S foi afetado pelo fator “adubação de Zn via pulverizações foliares”. O teor de K na biomassa do azevém não foi significativamente afetado pelos fatores estudados.

Para o centeio, verificou-se efeito significativo do fator “adubação de Zn no solo” sobre os teores de N, Ca e S e efeito significativo do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” sobre os teores de Ca e Mg. Os teores de P e K da parte aérea do centeio não foram significativamente afetados pelos fatores.

Na aveia preta, apenas os teores de N e Ca foram afetados pelo fator “adubação de Zn no solo”. Os teores de P, K, Mg e S da aveia preta não foram significativamente afetados

pelos efeitos dos fatores, bem como não houve efeito significativo do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” sobre o teor de nenhum nutriente.

Assim, verificou-se que o fator “adubação de Zn no solo” teve maior influência nos teores de macronutrientes na matéria seca das forrageiras que o fator “adubação de Zn via pulverizações foliares”. Nenhum dos macronutrientes estudados foi afetado pela interação entre os fatores (“adubação de Zn no solo” x “adubação de Zn via pulverizações foliares”) nas três forrageiras estudadas.

Os teores médios de macronutrientes na matéria seca de parte aérea foram (em g kg⁻¹): N = 37,01; P = 5,06; K = 30,60; Ca = 3,23; Mg = 1,44; e S = 12,79 para o azevém (aos 161 DAS); N = 26,12; P = 5,65; K = 18,83; Ca = 1,88; Mg = 1,49; e S = 14,82 para o centeio (aos 157 DAS); e N = 30,26; P = 6,72; K = 28,96; Ca = 3,03; Mg = 1,41; e S = 18,24 para a aveia preta (aos 151 DAS).

Os valores de teores de macronutrientes (em g kg⁻¹) na matéria seca do azevém, centeio e aveia preta estão apresentados na tabela 6 (azevém e centeio) e tabela 7 (aveia preta).

Tabela 6. Teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em g kg⁻¹, na matéria seca de parte aérea de azevém e centeio, aos 161 e 157 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Zn foliar	Azevém (g kg ⁻¹)								
	N			P			K		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	34,36	41,08	37,72	4,74	4,90	4,82	31,98	30,71	31,34
400-E1	31,45	46,30	38,88	4,80	5,31	5,06	29,97	30,34	30,16
800-E1	28,71	37,87	33,29	4,56	5,41	4,98	29,66	29,99	29,83
400-E2	32,16	45,15	38,65	4,65	5,23	4,94	30,65	27,45	29,05
800-E2	32,90	40,84	36,87	4,81	5,49	5,15	30,96	32,01	31,48
400-E1+E2	32,15	41,17	36,66	5,15	5,68	5,42	32,24	31,20	31,72
média	31,95 B	42,07 A		4,79 B	5,34 A		30,91	30,28	
Zn foliar	Ca			Mg			S		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
	Test	2,88	3,34	3,11	1,41	1,48	1,44	11,08	12,01
400-E1	2,71	4,16	3,44	1,38	1,50	1,44	12,37	13,28	12,83 cba
800-E1	2,38	4,08	3,23	1,40	1,47	1,43	11,44	14,49	12,97 cba
400-E2	2,58	3,80	3,19	1,39	1,46	1,42	11,58	12,68	12,13 cb
800-E2	2,78	3,97	3,37	1,39	1,54	1,47	12,60	13,76	13,18 ba
400-E1+E2	2,50	3,57	3,04	1,38	1,46	1,42	14,11	14,03	14,07 a
média	2,64 B	3,82 A		1,39 B	1,48 A		12,20	13,37	
Zn foliar	Centeio (g kg ⁻¹)								
	N			P			K		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	23,67	27,46	25,57	7,02	6,71	6,86	20,64	18,68	19,66
400-E1	24,70	29,96	27,33	7,03	6,55	6,79	19,33	17,40	18,37
800-E1	25,94	29,25	27,60	6,94	6,43	6,69	18,67	17,04	17,85
400-E2	23,96	25,72	24,84	6,63	6,73	6,68	20,90	18,01	19,46
800-E2	24,26	26,72	25,49	6,85	6,55	6,70	20,91	17,06	18,98
400-E1+E2	24,31	27,41	25,86	6,48	6,68	6,58	18,35	18,98	18,67
média	24,48 B	27,76 A		6,82	6,61		19,80	17,86	
Zn foliar	Ca			Mg			S		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
	Test	1,77	2,28	2,02 ba	1,48	1,45	1,47 cb	12,92	15,42
400-E1	1,88	2,85	2,36 a	1,54	1,55	1,54 cba	11,56	15,99	13,77
800-E1	1,56	2,49	2,02 ba	1,59	1,54	1,57 ba	12,46	19,27	15,87
400-E2	1,14	1,87	1,51 c	1,34	1,36	1,35 d	13,26	16,38	14,82
800-E2	1,32	1,69	1,52 c	1,42	1,46	1,44 dc	12,73	17,49	15,11
400-E1+E2	1,56	2,18	1,87 cb	1,52	1,63	1,57 a	11,89	18,53	15,21
média	1,54 B	2,23 A		1,48	1,50		12,47 B	17,18 A	

S/Zn = Sem Zn no solo; C/Zn = com Zn no solo.

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Quando houve efeito significativo pelo teste de F (Tabela 5), média seguida de diferente letra, maiúscula na linha comparando os tratamentos de Zn no solo e minúscula na coluna comparando os tratamentos de pulverizações foliares, denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Tabela 7. Teores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), em g kg⁻¹, na matéria seca de parte aérea de aveia preta, aos 151 DAS, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Zn foliar	Aveia preta (g kg ⁻¹)								
	N			P			K		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	27,79	34,68	31,23	7,02	6,71	6,86	32,64	27,75	30,20
400-E1	26,23	29,95	28,09	7,03	6,55	6,79	28,10	30,65	29,37
800-E1	32,67	34,19	33,43	6,94	6,43	6,69	31,08	28,38	29,73
400-E2	26,73	31,06	28,90	6,63	6,73	6,68	29,40	25,17	27,28
800-E2	26,49	31,44	28,97	6,85	6,55	6,70	26,39	30,64	28,51
400-E1+E2	26,78	35,17	30,97	6,48	6,68	6,58	27,05	30,32	28,69
média	27,78 B	32,75 A		6,82	6,61		29,11	28,82	
	Ca			Mg			S		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	2,53	3,36	2,95	1,37	1,43	1,40	19,11	18,16	18,63
400-E1	2,64	3,24	2,94	1,40	1,42	1,41	20,58	18,32	19,45
800-E1	2,50	3,52	3,01	1,44	1,42	1,43	19,83	17,50	18,67
400-E2	2,56	3,61	3,09	1,38	1,42	1,40	17,69	18,65	18,17
800-E2	2,97	3,43	3,20	1,39	1,45	1,42	18,27	15,78	17,03
400-E1+E2	2,64	3,35	3,00	1,39	1,44	1,41	18,00	16,99	17,50
média	2,64 B	3,42 A		1,39	1,43		18,91	17,57	

S/Zn = Sem Zn no solo; C/Zn = com Zn no solo.

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Quando houve efeito significativo pelo teste de F (Tabela 5), média seguida de diferente letra, maiúscula na linha comparando os tratamentos de Zn no solo e minúscula na coluna comparando os tratamentos de pulverizações foliares, denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

O fornecimento de Zn no solo, exatamente no sulco de semeadura, teve forte efeito nos teores de N e Ca, elevando os valores nas três forrageiras estudadas. Os teores de N e Ca foram incrementados em 32 e 45% no azevém, 13 e 45% no centeio e 18 e 30% na aveia preta.

O acréscimo do teor de N na matéria seca da forragem é desejável, desde que não ocasione alteração na produtividade (como foi verificado nesse estudo). Pois, o teor de N tem relação direta com o teor de proteína bruta, sendo que as proteínas das forragens contêm em média 16% de N (teor de proteína bruta = teor de N-total x 6,25). Elevado teor de proteínas na forragem é desejável, pois os suplementos proteicos elevam o custo na produção animal (HENNING; LACEFIELD; AMARAL-PHILLIPS, 1996). Assim, pode-se afirmar que nesse trabalho a adubação de Zn no solo melhorou a qualidade nutricional das forrageiras estudadas por aumentar o teor de N nos tecidos e, conseqüentemente, a concentração de proteína bruta. O Zn é fundamental para a síntese proteica nos vegetais. Provavelmente, a maior síntese de

proteínas estimulada pela adubação de Zn no solo exigiu que as forrageiras absorvessem maior quantidade de N do solo.

Em comparação com os teores de N de referência para a matéria seca de parte aérea de azevém e aveia preta (valores variando entre 21,7 a 38,5 g kg⁻¹ de N em função da produtividade esperada) que contam no Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná (SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2019), verifica-se que os teores médios de N encontrados na parte aérea das três forrageiras estudadas enquadram-se próximos dos valores de referência. Erenoglu et al. (2011), em um experimento de casa de vegetação utilizando vasos contendo solo para o cultivo das plantas, mostraram que o aumento na dose de 200 mg kg⁻¹ de N combinada a 5 mg kg⁻¹ de Zn elevou os níveis de absorção de Zn pelo trigo. Estando suprida adequadamente a demanda de N da planta, a translocação de Zn da zona radicular para a parte aérea é impulsionada. Isso se deve ao N na planta proporcionar maior síntese de proteínas transportadoras que atuam no xilema, além de compostos nitrogenados como o ácido desoximugineico (DMA) e a nicotianamina (NA) (SUZUKI et al., 2008; TRAMPCZYNSKA et al., 2010). Nesse sentido, o incremento de N no metabolismo de plantas de azevém favorece o incremento de teores de FDN e FDA, elevando a digestibilidade da massa de forragem (GODLEWSKA; CIEPIELA, 2021).

O acréscimo do teor de Ca nas forrageiras é desejável, haja vista sua função estrutural nos tecidos vegetais (TAIZ et al., 2017). Ainda, a adequada disponibilidade de P no solo geralmente é benéfica ao acúmulo de macro e micronutrientes, tais qual o Zn (NAKAGAWA; ROSOLEM, 2005). Nesse trabalho, a aplicação de Zn no solo aumentou os teores de P em 11% e de Mg em 6% na biomassa do azevém. O P é um nutriente presente em todas as células vivas, contribuindo para o crescimento de raízes e brotações, refletindo em maior volume de forragem e cobertura do solo (SHEN et al., 2011; TAIZ et al., 2017). Já o Mg destaca-se por ser o átomo central da molécula de clorofila e componente de ribossomos, participando, portanto, da fotossíntese e síntese de proteínas, o que melhora a qualidade nutricional da forragem (IPNI, 2018).

Na cultura do centeio, a aplicação de Zn no solo elevou em 38% o teor de S na biomassa. Maiores concentrações de S favorecem a síntese de aminoácidos como cistina, cisteína, metionina e taurina, aumentando o teor de proteína bruta na forragem (RECHCIGL, 1991). Fonseca et al. (2009) relataram aumento nas taxas de proteína bruta em capim-Tanzânia e proteína solúvel em capim-Marandu, sendo que ambos receberam Zn via solo.

Os tratamentos de adubação foliar de Zn tiveram menor efeito sobre os teores de nutrientes (exceto Zn) que a adubação de Zn no solo. Verificou-se que as pulverizações foliares de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2 e 400 g ha⁻¹ de Zn nas duas épocas (época-1 e época-2) elevaram o teor de S no azevém em relação à testemunha. As aplicações foliares de Zn também influenciaram os teores de Ca e Mg no centeio, tendendo a diminuir os valores com as pulverizações realizadas na época-2.

Os resumos da análise de variância para os teores de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8. Quadrados médios da análise de variância para teores de micronutrientes (Fe, Mn e Cu) na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação		GL	Azevém		
			Fe	Mn	Cu
Bloco	3		5836,0725 n.s.	534,9094 n.s.	20,8370 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1		17557,1325 *	4902,7440 *	474,7692 *
Resíduo 1	3		1422,1374	504,8727	23,0188
Zn-Foliar (Zn-F)	5		922,5823 n.s.	522,3301 n.s.	1,7395 n.s.
Zn-S × Zn-F	5		1584,1456 n.s.	408,7182 n.s.	5,3918 *
Resíduo 2	30		1243,5247	353,866	1,5793
CV 1 (%)			31,28	30,76	33,07
CV 2 (%)			29,25	25,75	8,66
Média			120,57	73,04	14,51
Fontes de Variação		GL	Centeio		
			Fe	Mn	Cu
Bloco	3		5118,5094 *	468,5217 n.s.	5,9066 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1		3794,9633 *	8899,3087 **	1757,0410 ***
Resíduo 1	3		428,9101	70,3227	2,7067
Zn-Foliar (Zn-F)	5		1872,2964 n.s.	206,1836 *	3,6604 **
Zn-S × Zn-F	5		1921,0343 n.s.	39,7700 n.s.	1,7416 n.s.
Resíduo 2	30		1437,0433	62,6361	0,9603
CV 1 (%)			20,61	18,12	15,38
CV 2 (%)			37,73	17,10	9,16
Média			100,46	46,27	10,70
Fontes de Variação		GL	Aveia preta		
			Fe	Mn	Cu
Bloco	3		10671,4461 n.s.	1426,7393 n.s.	1,9327 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1		47195,5461 *	193,3223 n.s.	367,0261 **
Resíduo 1	3		4508,3862	1653,2423	3,6660
Zn-Foliar (Zn-F)	5		1274,4951 n.s.	4333,7198 *	6,1768 n.s.
Zn-S × Zn-F	5		1663,7122 n.s.	944,9966 n.s.	3,4625 n.s.
Resíduo 2	30		1352,2582	1345,3281	5,4383
CV 1 (%)			52,88	38,55	15,62
CV 2 (%)			28,96	34,77	19,03
Média			126,98	105,49	12,25

¹GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, pelo teste de F.

Os teores médios de micronutrientes na matéria seca de parte aérea foram (em mg kg⁻¹): Fe = 120; Mn = 73; e Cu = 14 para o azevém (aos 161 DAS); Fe = 100; Mn = 46; e Cu = 11 para o centeio (aos 157 DAS); e Fe = 127; Mn = 105; e Cu = 12 para a aveia preta (aos 151 DAS).

O fator “adubação de Zn no solo” afetou os teores de Cu, Fe e Zn no azevém e centeio e os teores de Fe e Cu na aveia preta. O fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” teve menor efeito, afetando o teor de Mn no centeio e aveia preta e o teor de Cu no centeio. Ainda, verificou-se efeito da interação entre os fatores (“adubação de Zn no solo” x “adubação de Zn via pulverizações foliares”) sobre o teor de Cu no azevém (único caso de interação significativa entre os fatores, considerando todos os macros e micronutrientes estudados nas três forrageiras).

Os valores de teores de micronutrientes (em mg kg⁻¹) na matéria seca do azevém, centeio e aveia preta estão apresentados na tabela 9.

Tabela 9. Teores de micronutrientes (Fe, Mn e Cu), em mg kg⁻¹, na matéria seca de parte aérea de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn no solo e via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Zn foliar	Azevém (mg kg ⁻¹)								
	Fe			Mn			Cu		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	130,40	134,29	132,34	78,25	45,08	61,66	18,91 a	9,38 b	14,14
400-E1	108,43	117,61	113,02	92,60	59,09	75,84	17,71 ba	11,68 a	14,69
800-E1	86,35	132,86	109,61	81,54	85,36	83,45	16,86 b	11,87 a	14,37
400-E2	97,12	157,02	127,07	82,42	55,48	68,95	16,70 b	11,39 a	14,05
800-E2	92,96	127,52	110,24	75,12	62,11	68,62	17,42 ba	11,53 a	14,47
400-E1+E2	93,42	168,88	131,15	88,95	70,48	79,71	18,33 ba	12,34 a	15,33
média	101,45 B	139,70 A		83,15 A	62,93 B		17,65 A	11,37 B	

Zn foliar	Centeio (mg kg ⁻¹)								
	Fe			Mn			Cu		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	87,71	129,08	108,39	61,62	29,97	45,79 ba	16,97	4,78	10,88 ba
400-E1	87,57	131,07	109,32	64,65	36,61	50,63 a	16,77	5,79	11,28 a
800-E1	70,15	109,34	89,75	59,38	38,41	48,90 a	16,23	5,32	10,77 cba
400-E2	114,06	77,10	95,58	56,47	24,19	40,33 b	16,35	3,38	9,87 c
800-E2	74,39	83,17	78,78	53,71	26,67	40,19 b	16,31	3,51	9,91 cb
400-E1+E2	115,55	126,37	120,96	63,50	40,07	51,79 a	17,86	5,10	11,48 a
média	91,57 B	109,35 A		59,89 A	32,65 B		16,75 A	4,65 B	

Zn foliar	Aveia preta (mg kg ⁻¹)								
	Fe			Mn			Cu		
	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média	S/Zn	C/Zn	média
Test	94,03	173,21	133,62	133,42	112,61	123,02 a	15,53	9,52	25,05
400-E1	89,55	153,83	121,69	122,75	110,31	116,53 ba	14,41	10,35	24,77
800-E1	95,50	200,07	147,79	126,31	130,84	128,57 a	15,23	10,20	25,43
400-E2	100,53	128,49	114,51	53,90	85,69	69,79 c	12,64	8,44	21,08
800-E2	95,02	162,64	128,83	98,84	69,90	84,37 cb	16,67	9,41	26,08
400-E1+E2	99,11	131,80	115,46	109,74	111,53	110,64 ba	15,64	9,01	24,65
média	95,62 B	158,34 A		107,49	103,48		15,02 A	9,49 B	

S/Zn = Sem Zn no solo; C/Zn = com Zn no solo.

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Quando houve efeito significativo pelo teste de F (Tabela 8), média seguida de diferente letra, maiúscula na linha comparando os tratamentos de Zn no solo e minúscula na coluna comparando os tratamentos de pulverizações foliares, denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A adubação de Zn no solo teve forte influência nos teores dos micronutrientes estudados (Fe, Mn e Zn). O teor de Fe foi elevado com a adição de Zn no solo nas três forrageiras, sendo 38% no azevém, 19% no centeio e 40% na aveia preta. O incremento na concentração de Fe nas forrageiras é desejável por ser componente enzimático em processos

de oxidação e redução, catalisador da biossíntese de clorofila, além de atuar na transferência de elétrons e na redução de nitrito e de sulfito (FERNANDES; SOUZA; SANTOS, 2018). Ademais, o Fe é um nutriente essencial ao metabolismo de mamíferos consumidores da forrageira, visto que atua no transporte de oxigênio, está relacionado ao crescimento do indivíduo e é componente enzimático na oxidação da glicose. A deficiência de Fe em bovinos, por exemplo, é comum em animais jovens quando a concentração do nutriente no leite da vaca é inferior a 10 mg kg^{-1} (TEIXEIRA, 2001).

O Fe é considerado o nutriente mais limitante na população mundial (FAO, 2020; MORTARI; AMORIM; SILVEIRA, 2021). O Fe pode ser encontrado em alimentos de origem animal e vegetal. Nas carnes, a porção heme oriunda das hemácias é mais absorvível pelo organismo humano que a porção não-heme, que é absorvida lentamente. Assim, de todo o Fe ingerido, apenas 30% é absorvido. Disso, 70% é contido nas hemácias e 5% nas moléculas de mioglobina; 20% é armazenado como ferritina, encontrada principalmente no fígado, baço e medula óssea; e os 5% restantes são distribuídos a todas as células do organismo, onde são essenciais ao metabolismo energético (ALENCAR; KOHAYAGAWA; CAMPOS, 2002; SANTOS; DONADIA; SANTOS, 2010; SILVA et al., 2018).

Quanto aos demais micronutrientes estudados, o efeito da adubação de Zn no solo teve efeito inverso àquele observado para o Fe. Verificou-se que o fornecimento de Zn no solo reduziu o teor de Cu nas três espécies estudadas, na magnitude de 36% para o azevém, 72% para o centeio e 37% para a aveia preta. Apesar de sofrer alta redução, o centeio apresenta baixa sensibilidade à deficiência de Cu, ao contrário da aveia que é altamente sensível (CLARKSON, 1996). Nesse contexto, o fornecimento de Zn em excesso à aveia pode implicar em menor FDA, haja vista que o Cu compõe enzimas necessárias à síntese de lignina (LIU; LUO; ZHENG, 2018; MONDARDO et al., 2011b). Por conseguinte, estando a forrageira deficiente em Cu, seu consumo pode ocasionar diarreia de coloração escura, má coordenação motora e anemia nos animais (VILLAR, 2007).

Assim como o Cu, o Mn compete por sítios de absorção radicular com o Zn. A adição de Zn no solo reduziu o teor de Mn em 24% no azevém e 45% no centeio. No entanto, a interação entre P e Zn no solo foi benéfica para o acúmulo de Cu e Mn na massa seca de parte aérea de aceroleira e cacauieiro (CORRÊA et al., 2002; SOUZA et al., 2022). Dentre os cereais, a aveia é o mais sensível à deficiência de Mn, embora Iori et al. (2013) relataram que o fornecimento de Mn junto a adubação fosfatada não melhorou significativamente a

produção da cultura. Animais submetidos a dietas pobres em Mn estão sujeitos à infertilidade, claudicação e deformação óssea (RONDANELLI et al., 2021).

A adubação de Zn via pulverizações foliares teve menor efeito que àquele observado para o fornecimento de Zn no solo. O teor de Fe nas forrageiras não foi afetado pelas adubações de Zn via foliar. O teor de Mn no centeio e aveia preta e o teor de Cu no centeio tenderam a diminuir com as pulverizações foliares realizadas na época-2. No azevém houve interação entre os fatores para o teor de Cu. Sem Zn no solo, o teor de Cu do azevém diminuiu com as pulverizações foliares na dose 800 g ha⁻¹ na época-1 e 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2, porém, com a adubação de Zn no solo, a tendência se inverteu, com as pulverizações foliares elevando o teor de Cu na biomassa da espécie.

Salvo algumas exceções, a adubação foliar de Zn, especialmente realizada na época tardia (época-2) tendeu a diminuir os teores de Mn e Cu na biomassa das forrageiras. Resultados semelhantes foram obtidos na massa seca de sementes de plantas de feijoeiro nutridas com Zn via foliar, sendo verificado que o acúmulo de Cu foi inversamente proporcional as doses de Zn (TEIXEIRA et al., 2005). Nesse mesmo estudo foi encontrado que o acúmulo de Mn é maior na ausência de fornecimento de Zn às plantas.

4.5.4 Exportações de nutrientes

As exportações de nutrientes da área de cultivo com a colheita da biomassa das forrageiras, em kg ha⁻¹ para os macronutrientes e em g ha⁻¹ para os micronutrientes, foi estimada pela relação entre a produção de matéria seca obtida para cada forrageira com os respectivos teores de nutrientes. Os resumos da análise de variância para as exportações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) estão apresentados nas tabelas 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10. Quadrados médios da análise de variância para exportações de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação		Azevém						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	3779.91 n.s.	4.82 n.s.	6140.31 n.s.	24.26 n.s.	0.49 n.s.	186.76 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	147206.69 *	1009.34 **	7823.41 n.s.	1669.11 **	62.36 *	5843.69 **	
Resíduo 1	3	8206.25	13.00	5406.28	29.91	5.62	200.98	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	4590.26 n.s.	29.99 n.s.	3023.30 n.s.	39.03 n.s.	5.89 n.s.	231.19 n.s.	
Zn-S × Zn-F	5	5278.83 n.s.	64.90 n.s.	1553.19 n.s.	49.14 n.s.	4.99 n.s.	473.77 n.s.	
Resíduo 2	30	2585.48	51.75	2181.63	35.37	3.83	387.28	
CV 1 (%)		35.64	10.43	35.37	24.52	24.10	16.27	
CV 2 (%)		20.01	20.82	22.47	26.66	19.90	22.58	
Média		254.14	34.55	207.90	22.30	9.83	87.15	

Fontes de Variação		Centeio						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	5181.40 *	134.46 *	986.51 *	38.66 *	5.22 n.s.	774.04 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	4996.98 *	141.11 *	219.09 n.s.	148.51 **	2.37 n.s.	7033.49 **	
Resíduo 1	3	206.50	7.39	86.52	3.19	1.31	243.00	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	555.48 n.s.	21.52 n.s.	293.19 n.s.	23.57 **	1.22 n.s.	204.58 n.s.	
Zn-S × Zn-F	5	736.40 n.s.	31.65 n.s.	496.61 n.s.	5.85 n.s.	1.41 n.s.	243.48 n.s.	
Resíduo 2	30	812.88	24.61	476.49	6.33	1.93	193.23	
CV 1 (%)		12.58	11.12	11.35	21.60	17.75	24.29	
CV 2 (%)		24.97	20.29	26.64	30.44	21.51	21.66	
Média		114.20	24.45	81.94	8.27	6.46	64.17	

Fontes de Variação		Aveia preta						
	GL ¹	N	P	K	Ca	Mg	S	
Bloco	3	3680.24 n.s.	216.33 *	2729.07 n.s.	16.80 n.s.	5.16 n.s.	4347.95 n.s.	
Zn-Solo (Zn-S)	1	27152.48 **	0.35 n.s.	432.66 n.s.	574.15 *	5.15 n.s.	434.34 n.s.	
Resíduo 1	3	922.05	16.50	5897.79	26.08	3.23	1280.66	
Zn-Foliar (Zn-F)	5	2019.76 n.s.	79.74 n.s.	2119.87 n.s.	6.14 n.s.	1.60 n.s.	1234.98 n.s.	
Zn-S × Zn-F	5	1521.81 n.s.	61.04 n.s.	1208.46 n.s.	29.54 n.s.	1.76 n.s.	830.04 n.s.	
Resíduo 2	30	1912.35	108.39	2137.77	22.83	2.57	604.88	
CV 1 (%)		12.66	7.63	33.50	21.21	16.05	24.69	
CV 2 (%)		18.24	19.55	20.17	19.84	14.31	16.97	
Média		239.76	53.26	229.24	24.08	11.20	144.97	

¹GL = Grau de Liberdade. **, * e n.s. = $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, pelo teste de F.

Tabela 11. Quadrados médios da análise de variância para exportações de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, em função do fator “adubação de Zn no solo” (parcelas) e do fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” (subparcelas) (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Fontes de Variação		GL	Azevém			
			Fe	Mn	Cu	Zn
Bloco	3		244062.89 n.s.	29722.18 n.s.	887.93 n.s.	57928.58 *
Zn-Solo (Zn-S)	1		1804914.28 *	40603.24 n.s.	8956.04 *	235763.14 ***
Resíduo 1	3		89503.46	40717.82	910.40	2208.18
Zn-Foliar (Zn-F)	5		90100.27 n.s.	29881.22 n.s.	432.30 n.s.	326185.86 ***
Zn-S × Zn-F	5		99677.47 n.s.	30349.76 n.s.	1029.50 *	25819.80 n.s.
Resíduo 2	30		101532.62	29409.82	363.77	13753.23
CV 1 (%)			35.94	40.98	31.17	12.09
CV 2 (%)			38.28	34.82	19.70	30.17
Média			832.38	492.44	96.79	388.73
Fontes de Variação		GL	Centeio			
			Fe	Mn	Cu	Zn
Bloco	3		141633.91 *	20655.21 *	327.59 *	301.69 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1		172717.21 *	132426.03 ***	28939.05 ***	23700.30 n.s.
Resíduo 1	3		13513.93	771.70	24.88	3321.42
Zn-Foliar (Zn-F)	5		41285.12 n.s.	2542.62 n.s.	23.92 n.s.	165606.55 ***
Zn-S × Zn-F	5		64670.39 n.s.	2911.05 n.s.	134.04 n.s.	1460.84 n.s.
Resíduo 2	30		36551.98	3373.95	116.91	3002.94
CV 1 (%)			26.57	13.89	10.96	30.66
CV 2 (%)			43.69	29.05	23.76	29.16
Média			437.57	199.95	45.50	187.95
Fontes de Variação		GL	Aveia preta			
			Fe	Mn	Cu	Zn
Bloco	3		629423.30 n.s.	81559.00 n.s.	333.63 n.s.	178.38 n.s.
Zn-Solo (Zn-S)	1		2471417.49 *	2628.04 n.s.	19764.49 ***	21677.12 n.s.
Resíduo 1	3		265818.14	172710.08	62.47	9491.57
Zn-Foliar (Zn-F)	5		79731.19 n.s.	323258.17 *	456.19 n.s.	54335.01 ***
Zn-S × Zn-F	5		121894.61 n.s.	86261.92 n.s.	559.32 n.s.	3607.55 n.s.
Resíduo 2	30		76098.60	98732.37	473.11	8281.66
CV 1 (%)			51.90	49.46	8.19	32.79
CV 2 (%)			27.77	37.39	22.53	30.63
Média			993.33	840.31	96.55	297.11

¹GL = Grau de Liberdade. ***, **, * e n.s. = $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$, $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, pelo teste de F.

Para os macronutrientes, o fator “adubação de Zn no solo” afetou as exportações de N, P, Ca, Mg e S no azevém; as exportações de N, P, Ca e S no centeio; e as exportações de N e Ca na aveia preta. Já o fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” teve menor efeito, afetando significativamente apenas a exportação de Ca no centeio. Verificou-se que não houve efeito significativo da interação entre os fatores (“adubação de Zn no solo” x “adubação de Zn via pulverizações foliares”) para nenhum dos macronutrientes. Ainda, dos seis macronutrientes, apenas a exportação de K não foi afetada pelos fatores nas três forrageiras estudadas.

Quanto aos micronutrientes avaliados (Fe, Mn, Cu e Zn), o fator “adubação de Zn no solo” afetou significativamente as exportações de Fe e Cu nas três forrageiras; a exportação de Zn no azevém e a exportação de Mn no centeio. O fator “adubação de Zn via pulverizações foliares” afetou as exportações de Zn nas três forrageiras e a exportação de Mn na aveia preta. Ainda, o efeito da interação entre os fatores (“adubação de Zn no solo” x “adubação de Zn via pulverizações foliares”) influenciou significativamente a exportação de Cu no azevém.

Considerando as produções de biomassa seca de 6814, 4339 e 7920 kg ha⁻¹ para azevém (aos 161 DAS), centeio (aos 157 DAS) e aveia preta (aos 151 DAS), respectivamente, as exportações médias de macronutrientes foram (em kg ha⁻¹): N = 254; P = 34; K = 208; Ca = 22; Mg = 10; e S = 87 para o azevém; N = 114; P = 24; K = 82; Ca = 8; Mg = 6; e S = 64 para o centeio; e N = 240; P = 53; K = 229; Ca = 24; Mg = 11; e S = 145 para a aveia preta; e as exportações médias de micronutrientes foram (em g ha⁻¹): Fe = 832; Mn = 492; Cu = 97; e Zn = 388 para o azevém; Fe = 437; Mn = 200; Cu = 45; e Zn = 188 para o centeio; e Fe = 993; Mn = 840; Cu = 96; e Zn = 297 a aveia preta.

Em comparação com outros trabalhos encontrados na literatura, no caso de forragem de aveia preta cultivada em Latossolo Bruno, colhida no estágio de pré-florescimento, estimaram-se a produção de 5,5 t ha⁻¹ de biomassa seca, encontrando-se (em kg ha⁻¹): N = 273,46; P = 17,08; K = 203,50; Ca = 23,71; Mg = 8,86; (VICENSI et al., 2021). Já a cultura do centeio, extraiu, em média, (em kg ha⁻¹) N = 273,46; P = 14,84; K = 16,94; Ca = 1,6; Mg = 6,18 (KLIKOČKA H et al., 2022), e (em g ha⁻¹), Fe= 156,26; Mn= 426,5; Zn= 329,96; Cu= 355,06 (KLIKOČKA et al., 2020). Relataram-se também as exportações de macronutrientes pela cultura do azevém em torno de (em kg ha⁻¹): P = 9; K= 9; Ca = 23; Mg = 7; Na = 8 (GÓMEZ-REY; GARCÍA-MARCO; GONZÁLEZ-PRIETO, 2014), enquanto que os micronutrientes, com plantas no estágio de florescimento, foram (em g ha⁻¹), Fe = 136,28; Mn = 81,76; Zn = 54,51; Cu = 13,62 (LINDSTRÖM et al., 2014).

Como não houve efeito significativo das adubações de Zn sobre a produção de biomassa, os efeitos dos tratamentos sobre os teores de nutrientes da matéria seca tiveram forte influência sobre as exportações de nutrientes da área de cultivo. Conseqüentemente, as exportações de nutrientes foram mais fortemente afetadas pela adubação de Zn no solo que pela adubação de Zn via pulverizações foliares. Os valores de exportações de nutrientes nas três espécies forrageiras que foram significativamente afetados pela adubação de Zn no solo estão apresentados na figura 4.

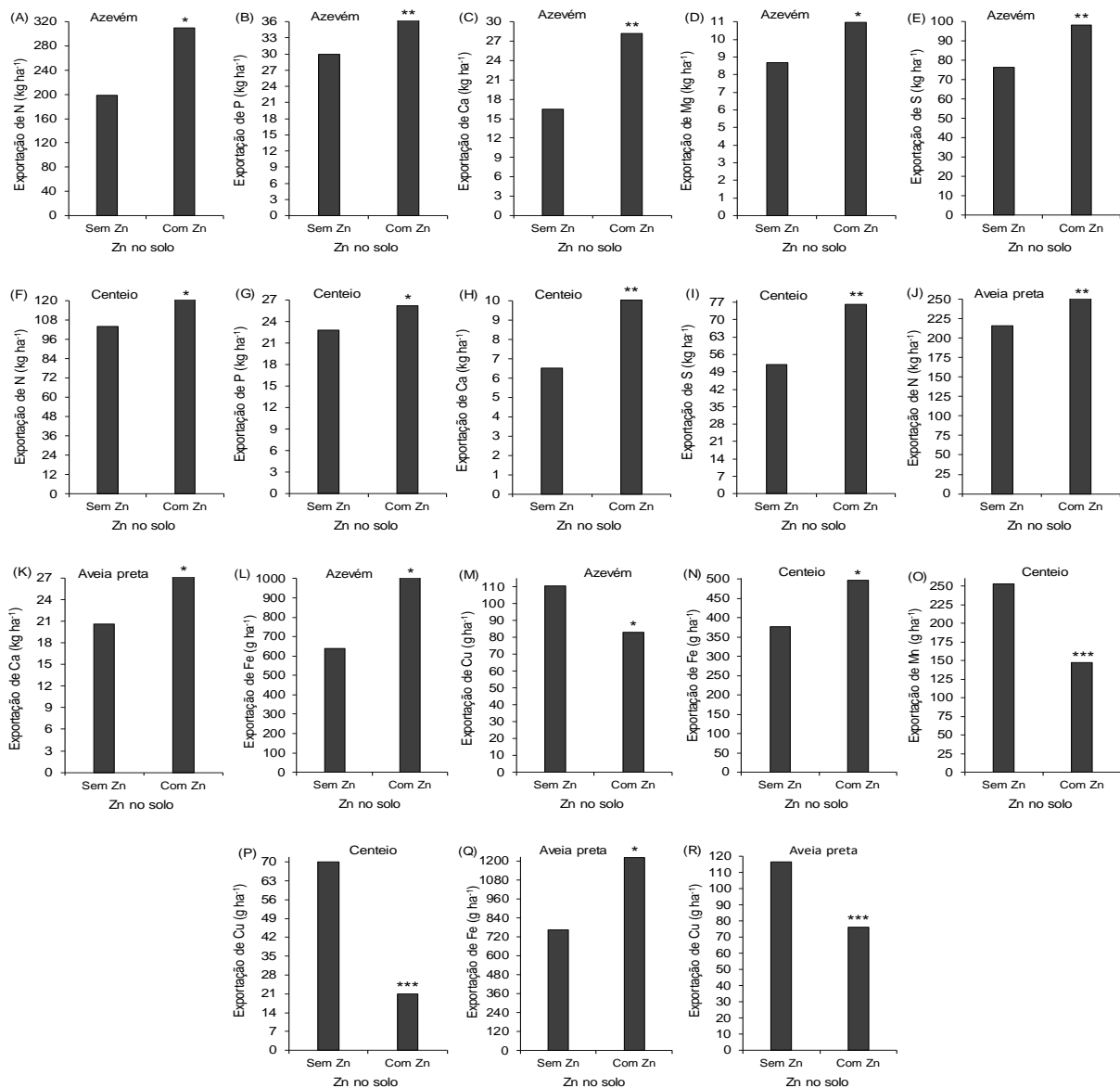


Figura 4. Exportações de nutrientes com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Macronutrientes (em kg ha⁻¹): exportações de N (Fig. 4A), P (Fig. 4B), Ca (Fig. 4C), Mg (Fig. 4D) e S (Fig. 4E) para o azevém, exportações de N (Fig. 4F), P (Fig. 4G), Ca (Fig. 4H) e S (Fig. 4I) para o centeio, e exportações de N (Fig. 4J) e Ca (Fig. 4K) para a aveia preta.

Micronutrientes (em g ha⁻¹): exportações de Fe (Fig. 4L) e Cu (Fig. 4M) para o azevém, exportações de Fe (Fig. 4N), Mn (Fig. 4O) e Cu (Fig. 4P) para o centeio, e exportações de Fe (Fig. 4Q) e Cu (Fig. 4R) para a aveia preta. ***, ** e * denotam $p \leq 0,001$, $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$, respectivamente, pelo teste de F.

Para os macronutrientes (em kg ha⁻¹), a adubação de Zn no solo elevou as exportações de nutrientes da área de cultivo com a colheita da biomassa das forrageiras. Nesse sentido, no azevém, as exportações de N, P, Ca, Mg e S foram incrementadas em 56, 31, 72, 26 e 29 %, respectivamente (Figuras 4 A, B, C, D e E); no centeio as exportações de N, P, Ca e S foram

aumentadas em 20, 15, 54 e 46%, respectivamente (Figuras 4 F, G, H e I); e na aveia preta as exportações de N e Ca foram elevadas em 22 e 33%, respectivamente (Figuras 4 J e K).

Assim, dentre os macronutrientes, as exportações de N e Ca foram acrescidas nas três forrageiras estudadas com a adubação de Zn no sulco de semeadura, juntamente com a adubação NPK, mostrando a forte influência que o íon Zn^{2+} do solo exerce sobre a absorção radicular de Ca^{2+} , amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-). Ainda, a adição de Zn no solo elevou as exportações de P e S em duas forrageiras (azevém e centeio) e a exportação de Mg no azevém, mostrando também o efeito positivo do Zn^{2+} na absorção de fosfato ($H_2PO_4^-$ e HPO_4^{2-}), sulfato (SO_4^{2-}) e Mg^{2+} pelas raízes das forrageiras. Possivelmente, essas respostas da adubação de Zn no solo sobre o aumento da absorção de macronutrientes pelas forrageiras estão relacionados com a função do Zn no metabolismo na planta, estimulando as raízes quanto à absorção de outros nutrientes, que o efeito direto da presença do íon Zn^{2+} no solo, pois, a concentração de Zn (um micronutriente) no solo é bem menor que a de um macronutriente. Nas plantas, o Zn permanece na forma iônica ou constitui enzimas, tal como a álcool desidrogenase, que é importante cofator enzimático e participa diretamente do crescimento vegetal ao promover a síntese de ácido-indol-acético (AIA). Além disso, o Zn é ativador enzimático na fotossíntese e colabora com a síntese proteica ao inibir a degradação do RNA (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). É possível que a presença de Zn no tecido vegetal aumente a tolerância da planta ao estresse hídrico, conforme abordado por Školníková (2020).

O acúmulo de macronutrientes em função do fornecimento de Zn também ocorre em outras culturas. Em milho fertilizado com dejetos líquidos suíno contendo Zn, houve aumento linear nos teores de N, P, K e Ca, conforme aumentou-se a dose (MONDARDO et al., 2011a). Em trigo, um fertilizante NPK+Zn, distribuído no sulco de semeadura elevou o acúmulo de Zn e P nos grãos. Por outro lado, observou-se que o excesso de P resulta em efeito antagônico entre os íons, reduzindo a concentração de Zn nos grãos (YANG, 2011). Em feijoeiro-comum, o Zn no solo aumentou em 19,5% o acúmulo de K nos grãos (KACHINSKI et al., 2020a).

Quanto aos micronutrientes (em $g\ ha^{-1}$), com exceção da exportação de Zn que será comentado mais adiante, a adubação de Zn no solo aumentou e diminuiu as exportações de Fe e Cu, respectivamente, nas três forrageiras, e também diminuiu a exportação de Mn no centeio. Assim, no azevém a exportação de Fe foi incrementada em 61% e a de Cu reduzida em 25%

(Figuras 4 L e M); no centeio a exportação de Fe foi incrementada em 32% e as de Cu e Mn reduzidas em 70 e 42%, respectivamente (Figuras 4 N, O e P); e a exportação de Fe foi incrementada em 59% e a de Cu reduzida em 35% na aveia preta (Figuras 4 Q e R).

O processo de contato entre íons da solução do solo e as raízes varia entre os nutrientes disponíveis no solo. Em média, 60% do Zn, 80% do Mn e 40% do Fe chegam à região de absorção radicular por difusão; os outros 50% do Fe e 70% do Cu são dependentes da interceptação radicular. Cu, Fe, Mn e Zn possuem raios iônicos parecidos e são absorvidos na forma de: Cu^{+2} , Cu-quelado, Fe^{+2} , Fe^{+3} , Fe-quelado, Mn^{+2} , Mn^{+3} , Mn-quelado, Zn^{+2} e Zn-quelado (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Todos esses nutrientes para serem absorvidos ativamente para o interior da célula das raízes requerem transportadores de membrana, de tal forma que a inibição competitiva entre os micronutrientes catiônicos nos transportadores de membrana celular se dá da seguinte forma: Fe^{+2} e Mn^{+2} ; Cu^{+2} e Fe^{+2} ; Cu^{+2} e Zn^{+2} ; e Mn^{+2} e Zn^{+2} .

A inibição entre íons nos sítios de absorção da raiz pode refletir negativamente na produção de biomassa, haja vista que a redução na absorção de micronutrientes afeta vários processos metabólicos na planta. Nesse sentido, Tiecher et al. (2016), em experimento de casa de vegetação cultivando plantas em vasos com solo, verificaram que em doses a partir de 60 mg kg^{-1} , o Zn passa a reduzir a produção de biomassa em aveia preta, bem como o acúmulo de Cu na massa seca de parte aérea. Embora existam relatos de antagonismo entre Zn e Fe, neste trabalho (FAQUIN, 2005), a presença de Zn aumentou a absorção de Fe. Esse Fe, por sua vez, pode restringir a absorção de Mn em arroz, o que também foi verificado nas forrageiras estudadas (ALVES, 2002; ZAHARIEVA; KASABOV; RÖMHELD, 1988).

Kachinski et al. (2020a) descreveram aumento na exportação de Fe quando as plantas de feijoeiro-comum receberam doses de Zn via foliar, sendo exportado 229 g ha^{-1} em relação aos 181 g ha^{-1} do tratamento testemunha (sem aplicação de Zn). Houve também acréscimo de 40% no acúmulo de Zn nas folhas e de 36% na exportação de Mn e 35% de Cu pela cultura. Por outro lado, na cultura do trigo, a pulverização de Zn e seu acúmulo nos grãos teve relação inversa com o teor Fe, ou seja, quanto maior a dose de Zn, menor a exportação de Fe (KACHINSKI et al., 2020b).

Como já mencionado, as exportações de nutrientes da área de cultivo foram pouco afetadas pelas adubações foliares de Zn (com exceção da exportação de Zn, que será abordado no próximo parágrafo). A exportação de Cu no azevém foi afetada pela interação entre os

fatores: sem adubação de Zn no solo, a exportação desse micronutriente tendeu a diminuir com as adubações foliares de Zn, especialmente nos tratamentos com pulverizações realizados na época mais tardia (tratamentos 400-E2 e 800-E2), porém, com a adubação de Zn no solo, os efeitos das aplicações foliares não foram significativos. Nas demais forrageiras, verificou-se diminuição nas exportações de Ca no centeio e de Mn na aveia preta com as pulverizações foliares de Zn realizadas na época mais tardia (Figura 5).

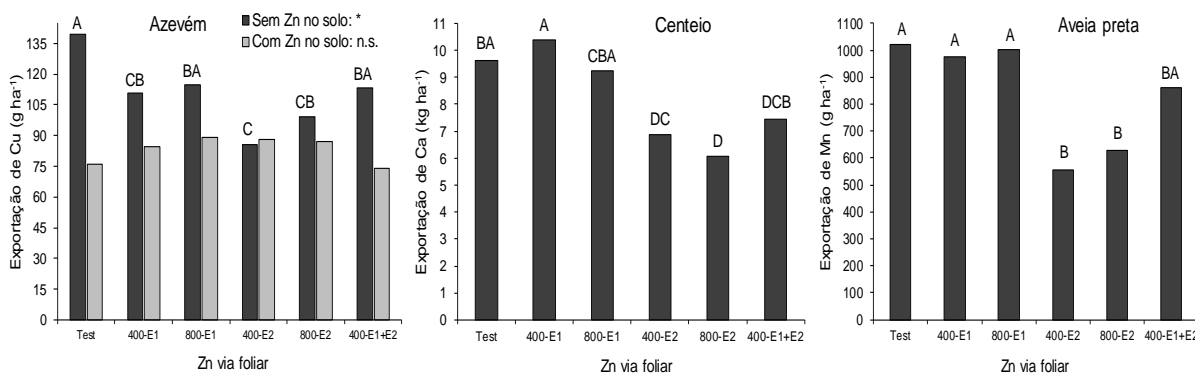


Figura 5. Exportação de Cu com a colheita da biomassa de azevém (aos 161 DAS), exportação de Ca com a colheita da biomassa de centeio (aos 157 DAS), e exportação de Fe com a colheita da biomassa de aveia preta (aos 151 DAS), em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Média seguida de diferente letra denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro. No azevém, * (Sem Zn no solo) e n.s. (Com Zn no solo) = $p \leq 0,05$ e $p > 0,05$, respectivamente.

A adubação de Zn no solo elevou em 44% a exportação do micronutriente da área de cultivo. A adição de Zn no solo também tendeu a aumentar em 27 e 15% a exportação de Zn no centeio e aveia preta, respectivamente, porém para essas duas forrageiras os efeitos não foram estatisticamente significativos (Figura 6).

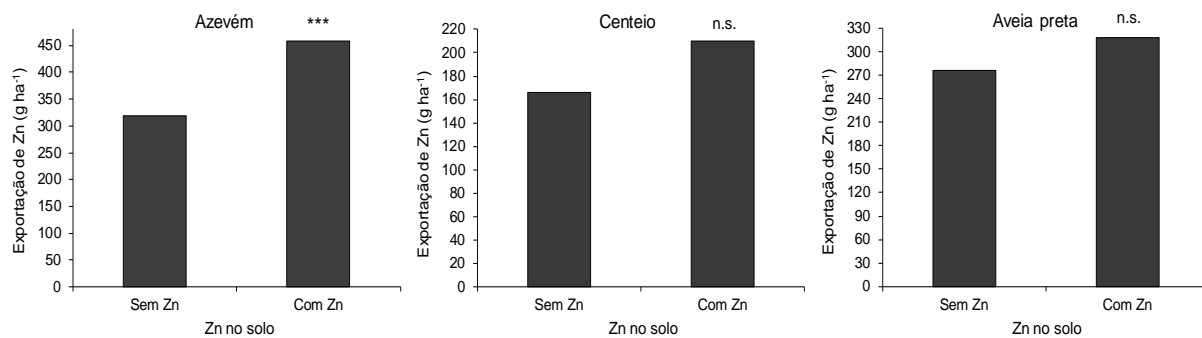


Figura 6. Exportação de Zn com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função dos tratamentos de aplicação de Zn no solo (sem Zn e com Zn), realizada durante a semeadura das gramíneas forrageiras (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

*** e n.s. denotam $p \leq 0,001$ e $p \geq 0,05$, respectivamente, pelo teste de F.

Embora a adubação de Zn no solo tenha elevado a exportação do micronutriente, os efeitos das adubações foliares de Zn foram bem maiores, especialmente quando realizado na época mais tardia. Assim, observou-se incrementos na magnitude de 2,8, 4,8 e 2,7 vezes nos tratamentos 400-E2, 800-E2 e 400E1+400E2 em comparação ao tratamento testemunha (sem adubação foliar de Zn) (Figura 7).

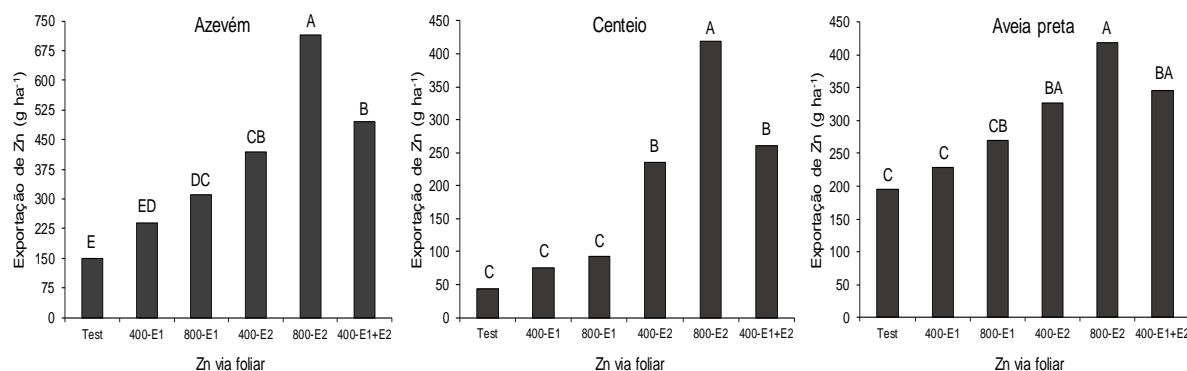


Figura 7. Exportação de Zn com a colheita da biomassa de azevém, centeio e aveia preta, aos 161, 157 e 151 DAS respectivamente, em função de tratamentos de adubação de Zn via pulverizações foliares (UNICENTRO, Guarapuava-PR, 2022).

Tratamentos: 1) Test = testemunha (sem pulverização foliar); 2) 400-E1 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 3) 800-E1 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-1; 4) 400-E2 = pulverização de 400 g ha⁻¹ de Zn na época-2; 5) 800-E2 = pulverização de 800 g ha⁻¹ de Zn na época-2; e 6) 400-E1+E2 = duas pulverizações de 400 g ha⁻¹ de Zn, uma na época-1 e outra na época-2.

Média seguida de diferente letra denota diferença significativa pelo teste de LSD de Fisher ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Assim, as pulverizações foliares de Zn na época mais tardia elevaram consideravelmente o teor do micronutriente nos tecidos das forrageiras (como foi apresentado na Figura 3), tendo como consequência a maior exportação de Zn da área de cultivo, já que a

produtividade de matéria seca não foi afetada. Resultados parecidos foram obtidos na cultura do feijoeiro comum (KACHINSKI et al., 2020a). Inocêncio et al. (2010), em experimento com soja cultivada sob um Latossolo Vermelho Distroférrico de textura muito argilosa, encontraram que a quantidade de Zn exportada da área com a colheita dos grãos foi afetada pela época e formas de fornecimento de Zn (via semente, solo e foliar) para as plantas.

4.6 Conclusões

A adubação de Zn não afetou a produção de biomassa de azevém, centeio e aveia preta, considerando as condições edafoclimáticas do sítio experimental.

Tanto a adubação de Zn no solo quanto via foliar elevaram o teor de Zn na matéria seca das forrageiras e a exportação de Zn da área de cultivo. Contudo, as pulverizações foliares de Zn na época mais tardia foram mais eficientes em biofortificar a biomassa das forrageiras com o micronutriente.

Quanto aos demais nutrientes, a adubação de Zn no solo elevou os teores e a exportações de N, Ca e Fe e reduziu o de Cu nas três forrageiras. Ainda, em pelo menos umas das forrageiras estudadas, a adição de Zn no solo também aumentou a absorção de P, Mg, S e reduziu a de Mn.

4.7 Referências Bibliográficas

ABIEC - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES. **Perfil da pecuária no Brasil**. Acesso em 21/10/2021. Disponível em: <<http://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2019/>>.

ABRANCHES, J. L. et al. Resposta da aveia preta à aplicação de zinco em Latossolo Vermelho Distrófico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 3, p. 278–282, 2009.

ALENCAR, N. X. DE; KOHAYAGAWA, A.; CAMPOS, K. C. H. DE. Metabolismo do ferro nos animais domésticos: revisão. **Revista de Educação Continuada em Medicina Veterinária e Zootecnia do CRMV-SP**, v. 5, n. 2, p. 196–205, 1 jul. 2002.

ALVES, B. Avaliação Da Disponibilidade De Macro e Micronutrientes Para Arroz De Sequeiro Cultivado Em Um Solo Calcário Da Região De Irecê, BAHIA1. 1 jan. 2002.

ANDREINI, C.; BANCI, L.; BERTINI, I.; ROSATO, A. Counting the zinc-proteins encoded in the human genome. **Journal of Proteome Research**, v. 5, n. 1, p. 196–201, 2006.

BATISTA, V. V. et al. Influence of winter crops on soybean productivity. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 53245–53254, 30 jul. 2020.

- CAKMAK, I.; KUTMAN, U. B. Agronomic biofortification of cereals with zinc: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 69, n. 1, p. 172–180, 2018.
- CAMILO, E. L. et al. Acúmulo e liberação de nutrientes por plantas de cobertura em cultivo solteiro, consórcio e policultivo na Região Sul do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e779997870–e779997870, 6 set. 2020.
- CLARKSON, D. T. Marschner H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. second edition. 889pp. London: Academic Press, £29.95 (paperback). **Annals of Botany**, v. 78, n. 4, p. 527–528, 1 out. 1996.
- CORRÊA, F. L. DE O. et al. Acúmulo de nutrientes em mudas de aceroleira adubadas com fósforo e zinco. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 24, p. 765–769, dez. 2002.
- DANTAS, C. C. O.; NEGRÃO, F. de M. Funções e sintomas de deficiência dos minerais essenciais utilizados para suplementação dos bovinos de corte. **UNICIÊNCIAS**, n. 65, p. 199–223, 2010.
- DEMÉTRIO, J. V.; COSTA, A. C. T. DA; OLIVEIRA, P. S. R. DE. Produção de biomassa de cultivares de aveia sob diferentes manejos de corte. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 42, n. 2, p. 198–205, jun. 2012.
- DUBREUIL, V. et al. Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, n. 37, 24 set. 2018.
- ERENOGLU, E. B. et al. Improved nitrogen nutrition enhances root uptake, root-to-shoot translocation and remobilization of zinc (65Zn) in wheat. **New Phytologist**, v. 189, n. 2, p. 438–448, jan. 2011.
- EZZATI, M.; LOPEZ, A. D.; RODGERS, A.; MURRAY, J.L., C. (ed.). **Comparative Quantification of Health Risks**. 2. ed. Geneva: World Health Organization, 2004.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS et al. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2020**. Roma: FAO, 2020.
- FAQUIN, V. **Nutrição mineral de plantas**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2005.
- FERNANDES, M. S.; SOUZA, S. R.; SANTOS, L. A. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2. ed. Viçosa, MG.: SBCS, 2018.
- FERRAZZA, J. M. et al. Production of annual winter forages at different sowing times. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 2, p. 379–389, jun. 2013.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n.6, p. 1039-1042, 2011.
- MAACK, R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 4ª Edição ed. Ponta Grossa: UEPG, 2012.

FONSECA, I. M. et al. Efeito do zinco nos componentes metabólitos dos capins Tanzânia e Marandú. **Boletim de Indústria Animal**, v. 66, n. 2, p. 121–127, 13 fev. 2009.

GODLEWSKA, A.; CIEPIELA, G. A. Italian Ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) Fiber Fraction Content and Dry Matter Digestibility Following Biostimulant Application against the Background of Varied Nitrogen Regime. **Agronomy**, v. 11, n. 1, p. 39, jan. 2021.

GÓMEZ-REY, M. X.; GARCÍA-MARCO, S.; GONZÁLEZ-PRIETO, S. J. Soil P and cation availability and crop uptake in a forage rotation under conventional and reduced tillage. **Soil Use and Management**, v. 30, n. 4, p. 445–453, dez. 2014.

GONÇALVES, F. A. R. et al. Influência da saturação por bases do solo sobre a disponibilidade e absorção de zinco. **Cultura Agronômica (Online)**, v. 27, n. 2, p. 262–272, 2018.

HENNING, J. C.; LACEFIELD, G. D.; AMARAL-PHILLIPS, D. **Interpreting forage quality reports**. Lexington, KY: University of Kentucky, College of Agriculture, 1996.

INOCÊNCIO, M. F. **Respostas da soja a diferentes alternativas de adubação de restituição de zinco em solo de cerrado**. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 68 p. 2010.

IORI, P. et al. Oat production in soils with different densities as a function of fertilizer phosphorus and manganese. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, v. 11, n. S1, 2013.

IPNI - INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE. **Magnésio. Nutri - Fatos**, 2018. Disponível em: <[http://www.ipni.net/publication/nutrifacts-brasil.nsf/0/4EFEE30E1B302B318325818600449744/\\$FILE/NutriFacts-BRASIL-6.pdf](http://www.ipni.net/publication/nutrifacts-brasil.nsf/0/4EFEE30E1B302B318325818600449744/$FILE/NutriFacts-BRASIL-6.pdf)>

KACHINSKI, W. D. et al. Nutrition, yield and nutrient export in common bean under zinc fertilization in no-till system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, p. e029019, 2020a.

KACHINSKI, W. D. et al. Teores de zinco e ferro em grãos de cultivares de trigo sob pulverização foliar de zinco. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 6, p. e96963482–e96963482, 19 abr. 2020b.

KLIKOCCA, H. et al. Improvement of the Content and Uptake of Micronutrients in Spring Rye Grain DM Through Nitrogen and Sulfur Supplementation. **Agronomy**, v. 10, n. 1, p. 35, jan. 2020.

KLIKOCCA H et al. The response of spring rye (*Secale cereale* L.) to NPK and S fertilizers. The content and uptake of macronutrients and the value of ionic ratios. v. 2, n. 27, p. 15, 2022.

LARGE, E. C. Growth Stages in Cereals Illustration of the Feekes Scale. **Plant Pathology**, v. 3, n. 4, p. 128–129, 1954.

- LINDSTRÖM, B. E. M. et al. Micronutrient concentrations in relation to phenological development of red clover (*Trifolium pratense* L.), perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) and timothy (*Phleum pratense* L.). **Grass and Forage Science**, v. 69, n. 2, p. 276–284, jun. 2014.
- LIU, Q.; LUO, L.; ZHENG, L. Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 19, n. 2, p. 335, fev. 2018.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, n. spe, p. 133–146, jul. 2009.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997.
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. **Academic Press**, 3ª Ed. London, 2012. 651p.
- MICHALOVICZ, L. et al. Soil chemical attributes, nutrient uptake and yield of no-till crops as affected by phosphogypsum doses and parceling in southern Brazil. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 65, n. 3, p. 385–399, 23 fev. 2019.
- MONDARDO, D. et al. Produção e composição químico-bromatológica da aveia preta fertilizada com doses crescentes de dejetos líquidos suíno. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 509–517, jun. 2011a.
- MONDARDO, D. et al. Produção e composição químico-bromatológica da aveia preta fertilizada com doses crescentes de dejetos líquidos suíno. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 509–517, jun. 2011b.
- MORAES, Y. J. B. D. **Forrageiras: Conceitos, Formação e Manejo**. Guaíba: Livraria e Editora Agropecuária, 1995.
- MOREIRA, C.; CAMACHO, M. A.; GRAICHEN, F. A. S. Redução da severidade da brusone do trigo com aplicação foliar de sulfato de zinco. **Summa Phytopathologica**, v. 46, p. 255–259, 21 set. 2020.
- MORTARI, I. F.; AMORIM, M. T.; SILVEIRA, M. A. DA. Estudo de correlação da anemia ferropriva, deficiência de ferro, carência nutricional e fatores associados: Revisão de literatura. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 9, p. e28310917894–e28310917894, 26 jul. 2021.
- MURGIA, I.; DE GARA, L.; GRUSAK, M. A. Biofortification: how can we exploit plant science and biotechnology to reduce micronutrient deficiencies? **Frontiers in Plant Science**, v. 4, 2013.
- NAKAGAWA, J.; ROSOLEM, C. A. Teores de nutrientes na folha e nos grãos de aveia-preta em função da adubação com fósforo e potássio. **Bragantia**, v. 64, p. 441–445, 2005.

NASCIMENTO, M. R. L. DO et al. Culturas de inverno na supressão de plantas daninhas: relação com o desenvolvimento inicial da cultura da soja (*Glycine max*). **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 1, p. 58–67, 16 dez. 2021.

NISHI, Y. Zinc and growth. **Journal of the American College of Nutrition**, v. 15, n. 4, p. 340–344, 1996.

PAVAN, M. A. et al. **Manual de análise química de solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. 40 p. (IAPAR. Circular 76).

PEREIRA, T. C.; SARON, M. L. G.; CARVALHO, W. A. de; VILELA, M. M.; HOEHR, N. F.; HESSEL, G. Research on zinc blood levels and nutritional status in adolescents with autoimmune hepatitis. **Arquivos de Gastroenterologia**, v. 48, n. 1, p. 62–65, 2011.

PIPOLO, V. C.; GARCIA, I. P.; ASSIS, J. S. Níveis de zinco e fósforo em amostras de solo corrigidas com calcário na produção de matéria seca do milho-doce (*Zea mays* var. *Saccharata*). **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 20, p. 297–299, 1998.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S.; KUMAR, D. Chapter Two - Agronomic Biofortification of Cereal Grains with Iron and Zinc. Em: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**. [s.l.] Academic Press, 2014. v. 125p. 55–91.

RECHCIGL, J. E. Sulphur Fertilization Improves Bahiagrass Pastures. p. 3, 1991.

RONDANELLI, M. et al. Essentiality of Manganese for Bone Health: An Overview and Update. **Natural Product Communications**, v. 16, n. 5, p. 1934578X211016649, 1 maio 2021.

ROOHANI, N. et al. Zinc and its importance for human health: An integrative review. **Journal of Research in Medical Sciences: The Official Journal of Isfahan University of Medical Sciences**, v. 18, n. 2, p. 144–157, fev. 2013.

SADEGHZADEH, B. A review of zinc nutrition and plant breeding. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**. vol. 13, p. 905-927, 2013.

SANTOS, A. F. S.; DONADIA, J. T.; SANTOS, L. L. D. FERRO: BENEFÍCIOS A SAÚDE. p. 4, 2010.

SHEN, J. et al. Phosphorus Dynamics: From Soil to Plant. **Plant Physiology**, v. 156, n. 3, p. 997–1005, 1 jul. 2011.

SHER, A. et al. Zinc sulfate application to grass forages (oat, barley, annual ryegrass and triticale) for increasing their yield, quality and profitability. **Crop and Pasture Science**, v. 73, n. 5, p. 473–483, 15 mar. 2022.

SILVA, E. C. A. et al. **Absorção Celular de Ferro Pelo Organismo Humano: uma Breve Revisão**. International Journal of Nutrology. **Anais...** Thieme Revinter Publicações Ltda, set. 2018. Disponível em: <<http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0038-1674353>>. Acesso em: 15 ago. 2022

SILVA, F. C. DA (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009.

SILVA, M. A. G. D.; PORTO, S. M. A.; MANNIGEL, A. R.; MUNIZ, A. S.; MATA, J. D. D. V. D.; NUMOTO, A. Y. Manejo da adubação nitrogenada e influência no crescimento da aveia preta e na produtividade do milho em plantio direto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 275-281, 2009.

SOUZA, A. D. M.; PEREIRA, R. a; YOKOO, E. M.; LEVY, R. B.; SICHIERI, R. Alimentos mais consumidos no Brasil: Inquérito Nacional de Alimentação 2008-2009. **Revista Saúde Pública**, v. 47, p. 190–199, 2013.

SOUZA, C. A. et al. Doses de fósforo e zinco no acúmulo de macro e micronutrientes em mudas de cacaueteiro. 15 ago. 2022.

SUZUKI, M. et al. Deoxymugineic acid increases Zn translocation in Zn-deficient rice plants. **Plant Molecular Biology**, v. 66, n. 6, p. 609–617, 1 abr. 2008.

ŠKOLNÍKOVÁ, M. The effect of zinc application on annual ryegrass (*Lolium multiflorum*) under drought stress. **Acta fytotechnica et zootechnica**, v. 23, n. 4, p. 198–204, 31 dez. 2020.

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: [s.n.].

TEIXEIRA, I. R. et al. Teores de nutrientes e qualidade fisiológica de sementes de feijão em resposta à adubação foliar com manganês e zinco. **Bragantia**, v. 64, n. 1, p. 83–88, 2005.

TEIXEIRA, J. C. **Nutrição de ruminantes**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2001.

TIECHER, T. L. et al. Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 253–263, set. 2016.

TRAMPCZYNSKA, A. et al. Nicotianamine forms complexes with Zn(ii) in vivo†. **Metallomics**, v. 2, n. 1, p. 57–66, 1 jan. 2010.

VICENSI, M. et al. Black oat (*Avena strigosa*) forage yield and quality under nitrogen fertilisation and long-term gypsum. **Crop and Pasture Science**, v. 72, n. 12, p. 1034–1047, 1 dez. 2021.

VILLAR, M. L. P. **Manual de interpretações de análise de plantas e solos e recomendação de adubação**. EMPAER-MT, 2007. Disponível em: <<http://www.empaer.mt.gov.br/documents/8024815/9382198/Manual+de+Interpreta%C3%A7%C3%A3o+de+An%C3%A1lise+de+Plantas+e+Solos+e+Recomenda%C3%A7%C3%A3o+de+Aduba%C3%A7%C3%A3o/09cae279-bdf6-5b4a-4b05-67fe9b4522f1>>

XU, M. et al. Spraying high concentrations of chelated zinc enhances zinc biofortification in wheat grain. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 102, n. 9, p. 3590–3598, jul. 2022.

WELCH, R. M. et al. No Potential for improving bioavailable zinc in wheat grain (*Triticum* species) through plant breeding. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 53, p. 2176–2180, 2005.

YANG, X. Impacts of phosphorus and zinc levels on phosphorus and zinc nutrition and phytic acid concentration in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of the science of food and agriculture**, v. 91, n. 13, p. 2322–2328, out. 2011.

ZAHARIEVA, T.; KASABOV, D.; RÖMHELD, V. Responses of peanuts to iron-manganese interaction in calcareous soil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 11, n. 6–11, p. 1015–1024, 1 jun. 1988.

ZALEWSKI, P. D. et al. Zinc metabolism in airway epithelium and airway inflammation: basic mechanisms and clinical targets. A review. **Pharmacology & Therapeutics**, v. 105, n. 2, p. 127–149, fev. 2005.

ZOZ, T. et al. Response of wheat to foliar application of zinc/ Resposta do trigo a aplicacao foliar de zinco. **Ciência rural**, v. 42, n. 5, p. 784–787, 2012.