

EFEITOS DE UM PROTÓTIPO DE FERTILIZANTE DE ZINCO DE LIBERAÇÃO LENTA NO CRESCIMENTO E COMPOSIÇÃO BROMATOLÓGICA DE MILHO

Gabriela Blank da Silva¹; Milene Lopes dos Santos ²; Cristiane Amanda de Oliveira³; Natiel Braga Furtado⁴; Marcio Nunes Corrêa⁵; Eliza Rossi Komninou⁶.

¹Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Departamento de Zootecnia; Núcleo de Pesquisa, Ensino e Extensão em Pecuária (NUPEEC Hub) - gabrielablank88@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas, NUPEEC Hub - milenelopessantos0312@gmail.com

³Universidade Federal de Pelotas, NUPEEC Hub - cris_amanda@outlook.com

⁴Universidade Federal de Pelotas, NUPEEC Hub - natielbragafurtado7921@gmail.com

⁵Universidade Federal de Pelotas, NUPEEC Hub - marcio.nunescorrea@gmail.com

⁶Universidade Federal de Pelotas, NUPEEC Hub - elizarossikom@gmail.com

1. DESCRIÇÃO DA INOVAÇÃO

Detalhamento do Produto/Serviço: O presente projeto descreve o desenvolvimento e a validação agrônômica de um protótipo de fertilizante organomineral de zinco (Zn) de liberação lenta. Esta inovação tecnológica foi projetada para otimizar o fornecimento de micronutrientes ao solo de forma sincronizada com as necessidades fisiológicas das culturas agrícolas, com foco no milho híbrido precoce (Pioneer P3016VYHR). Diferente das formulações tradicionais sulfatadas de alta solubilidade, o Protótipo regula a taxa de difusão de zinco no solo. Sua formulação e design físico visam reduzir perdas causadas por lixiviação, escoamento superficial e fixação no solo, assegurando uma adubação contínua e de longo prazo durante as etapas cruciais de crescimento vegetativo das plantas.

Diferenciais: O principal diferencial do Protótipo em relação ao que existe no mercado, como o sulfato de zinco convencional de rápida dissolução, reside na sua capacidade de evitar a liberação imediata e o pico de concentração inicial de íons no solo, mitigando o risco de fitotoxicidade radicular. Testes práticos de campo conduzidos na safra 2024-2025 em uma área experimental de 0,3 ha no Campus Capão do Leão da UFPEL demonstraram que o Protótipo aumentou significativamente a altura final das plantas de milho (279,75 cm) em comparação ao fertilizante comercial convencional (263,40 cm) ($p < 0,0001$), indicando que a tecnologia de liberação lenta promoveu um desenvolvimento vigoroso e equilibrado da forragem de milho produzida, sem interferir na composição bromatológica (MS, MM, Proteína Bruta, NDT, FDN, FDA) da cultura.

2. ANÁLISE DE MERCADO

Público-alvo: O público-alvo prioritário é composto por produtores comerciais de milho de alta produtividade, cooperativas agrícolas e empresas dedicadas à produção de silagem de alta qualidade e grãos biofortificados. O produto também se destina a produtores inseridos em programas estatais ou globais de segurança alimentar voltados à redução da desnutrição por micronutrientes. A deficiência de zinco e ferro na alimentação humana representa uma grave ameaça à saúde pública global (fome oculta), afetando mais de 2 bilhões de pessoas, principalmente em países em desenvolvimento (Jan et al., 2020). A biofortificação agrônômica via adubação com o Protótipo atende diretamente à necessidade crítica desses mercados por alimentos e rações com densidade mineral aprimorada e financeiramente viável.

Concorrentes: Os concorrentes diretos são as fontes de fertilização convencional de alta solubilidade (ex. sulfato de zinco em pó). Embora estas alternativas de mercado

possuam menor custo inicial de aquisição por unidade, sua eficiência de absorção é baixa devido às rápidas perdas físicas e químicas ocorridas logo após a aplicação. Sob certas condições de pH e interações com outros nutrientes no solo (por exemplo, alta disponibilidade de fósforo, que precipita o zinco e induz a deficiência), o zinco convencional torna-se indisponível, demandando repetidas aplicações foliares de alto custo operacional (Jan et al., 2020). O Protótipo posiciona-se como um produto de alta eficiência e aplicação simplificada de via única no solo.

Potencial de Mercado: O milho é uma das culturas de cereais mais cultivadas do mundo e atua como pilar de segurança alimentar e base nutricional para humanos e animais (Feng et al., 2026). A demanda global por tecnologias agrícolas ecológicas, que combinem maior produtividade com redução do impacto ambiental, expande significativamente o mercado potencial (TAM, SAM, SOM) de fertilizantes especiais. O Protótipo tem capacidade para capturar uma fatia expressiva do mercado de adubação de precisão de milho em regiões tropicais e subtropicais que sofrem com solos cronicamente deficientes em zinco.

3. ESTRATÉGIA DE DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO

Modelo de Negócios: A receita do projeto será gerada a partir do licenciamento de tecnologia de revestimento e formulação industrial para grandes fabricantes de defensivos e fertilizantes minerais nacionais e multinacionais, além da venda direta do insumo estruturado por meio de canais de distribuição regionais de sementes e insumos agropecuários. Embora fertilizantes de liberação lenta apresentem um custo superior por tonelada comparado à ureia e sais minerais comuns (Feng et al., 2026), o aumento comprovado no vigor inicial da lavoura e a drástica redução na necessidade de intervenções adicionais por pulverização foliar garantem um retorno econômico líquido superior ao produtor final.

Propriedade Intelectual: O design da composição do Protótipo, que envolve processos específicos e incorporado a uma matriz orgânica, possui previsão de depósito de patente de invenção perante o Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI) do Brasil, assegurando exclusividade de exploração comercial e vantagem competitiva.

Etapas de Desenvolvimento e Maturidade Tecnológica (TRL): Atualmente, a inovação encontra-se no nível de Maturidade Tecnológica TRL 5 (Tecnologia validada em ambiente relevante). Durante a fase experimental, foram executados os testes de campo na área de lavoura de 0,3 ha no Campus Capão do Leão da UFPEL. A metodologia prática envolveu a amostragem inicial do solo e sua análise química no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel (FAEM), seguida pela dessecagem da vegetação nativa com glifosato (10 L/ha) e três operações de gradeamento para revolvimento do terreno. O solo recebeu adubação corretiva com FidaGran Boro como neutralizador de pH (80 kg de KS05+ B Plus e 80 kg de KSG10+ B Plus) em substituição ao calcário tradicional, acompanhada por 150 kg de NPK (10-20-20) e 150 kg de Cloreto de Potássio (KCl). O milho Pioneer P3016VYHR foi semeado na população estimada de 49.000 plantas/ha. Os ensaios em canteiros de 135 m² compararam o Protótipo (5 kg de Zn/ha) com um Controle Positivo (5 kg de Zn/ha em pó de rápida dissolução) e um Controle Negativo (sem aplicação de zinco). As avaliações de altura final e bromatologia,

com análise de tecidos por espectrometria de absorção atômica, validaram a funcionalidade física e biológica do insumo.

Desafios e Riscos: O principal desafio de mercado está relacionado à resistência inicial dos pequenos produtores ao investimento em tecnologias de maior custo unitário, o que pode ser contornado através de políticas públicas de incentivo agrícola sustentável ou subsídios governamentais para agricultura verde (Feng et al., 2026). Sob o ponto de vista biológico, observou-se que o vigoroso crescimento das plantas fertilizadas com o Protótipo acarretou em um efeito de diluição do zinco mineral acumulado nos tecidos. Portanto, há um risco de não atingir os níveis desejados de biofortificação sob dosagens baixas. Para mitigar esse risco, planejam-se novas etapas de desenvolvimento com dosagens incrementais do nutriente e o desenvolvimento de formulações mistas com outros minerais sinérgicos que facilitem a absorção e acúmulo de zinco (Jan et al., 2020).

4. RESULTADOS ESPERADOS E IMPACTO

Impacto Social e Ambiental: Sob a perspectiva social, a tecnologia oferece uma ferramenta ágil e de alta sustentabilidade para promover a segurança nutricional e a ingestão de micronutrientes em populações vulneráveis que dependem de culturas de subsistência e que não possuem acesso fácil a alimentos fortificados industrialmente (Jan et al., 2020). Ambientalmente, a liberação lenta de nutrientes é um fator determinante para reduzir a lixiviação de nitrogênio e a escorrecia de sais minerais para mananciais hídricos locais, reduzindo drasticamente a pegada ecológica da lavoura e promovendo a conservação biológica do ecossistema agrícola (Feng et al., 2026).

Resultados Experimentais de Campo: A tabela abaixo resume os resultados biológicos obtidos em campo a partir do experimento de validação agrônômica. A análise estatística foi conduzida por meio do método ANOVA *Mixed Model* no software JMP Pro 14. Foi considerado significativo quando $p \leq 0.05$.

Tabela 1. Altura final, composição bromatológica e acúmulo de zinco em tecidos vegetais de milho com adubação de um protótipo de fertilizante de zinco de liberação lenta.

Parâmetro Avaliado	Controle Negativo	Controle Positivo	Protótipo	EPM ¹	Valor de p
Altura final (cm)	276,80 ^A	263,40 ^B	279,75 ^A	2,07	<0,0001
Matéria Seca (%)	19,45	19,58	19,28	2,61	0,99
Matéria Mineral (%)	6,15	5,89	5,92	0,52	0,92
Fibra Bruta (%MS)	31,72	32,31	33,01	1,81	0,88
Fibra em Detergente Neutro(%MS)	58,78	59,44	60,07	2,56	0,93
Fibra em Detergente Ácido (%MS)	38,04	35,91	36,41	1,82	0,71
Extrato Etéreo (%MS)	2,05	1,87	1,84	0,35	0,90
Proteína Bruta (%MS)	12,76	12,94	12,43	2,50	0,98
Nutrientes Digestíveis Totais (%MS)	58,29	57,89	57,40	1,46	0,91
Zn em Tecidos (mg/kg)	40,58 ^{AB}	43,48 ^A	34,72 ^C	1,94	0,02

¹EPM: Erro padrão da média; Letras diferentes indicam diferença estatística entre os tratamentos ($p < 0,0001$).

Análise dos Resultados (O 'So What' dos Dados): Os dados da Tabela 1 revelam dois pontos importantes. Houve maior altura final nas plantas de milho no canteiro que recebeu adubação com o Protótipo em comparação ao canteiro que recebeu o fertilizante comercial convencional (Controle Positivo), porém observou-se semelhante altura com o controle sem adubação (Controle Negativo). Isso indica que o fertilizante comercial de alta solubilidade (Controle Positivo), pela rápida dissolução, pode ter induzido picos de toxicidade radicular salina ou desequilíbrio metabólico inicial que prejudicou o desenvolvimento vegetativo posterior. Já o acúmulo de zinco nos tecidos vegetais com o Protótipo foi estatisticamente inferior ao do Controle Positivo. Essa redução no valor relativo de concentração é explicada pelo clássico efeito de diluição de nutrientes: como o protótipo induziu plantas com maior crescimento físico e superior desenvolvimento vegetativo (maior altura e biomassa), a quantidade total do mineral absorvido diluiu-se no maior volume de matéria seca acumulada, reduzindo a concentração final por quilograma de tecido foliar seco (Jan et al., 2020).

Visão de Futuro: Os próximos passos envolvem o refinamento da formulação e a condução de ensaios com dosagens superiores a 5 kg de Zn/ha para compensar o efeito de diluição física e maximizar a concentração mineral final na parte vegetal e grãos sem prejuízo ao crescimento vegetativo.

5. CONCLUSÕES

Síntese: O Protótipo demonstrou viabilidade física, agrônômica e biológica como fertilizante de zinco de liberação lenta. Ele se destaca em relação ao fertilizante comercial convencional por impulsionar maior altura final da planta sem alterar as características bromatológicas e qualitativas da forragem de milho híbrido precoce. Embora o primeiro teste a campo tenha induzido ao efeito de diluição do zinco devido ao vigoroso crescimento vegetativo inicial, a estabilidade e eficiência de fornecimento nutricional garantem seu posicionamento como uma inovação promissora para o manejo sustentável de grandes culturas agrícolas.

Chamada para Ação: Convidamos parceiros estratégicos industriais da cadeia de nutrição vegetal, cooperativas agrícolas focadas em sustentabilidade e investidores institucionais da área de agrotecnologia (CleanTechs e AgriTechs) a colaborarem na escala industrial e nos testes comerciais em escala regional (TRL 6 a 9) desta tecnologia inovadora que alia alto rendimento operacional, biofortificação e maior sustentabilidade no campo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CRISTOVAM, B. S. et al. Impactos da insegurança alimentar e nutricional no desenvolvimento infantil. **Revista Eletrônica Acervo Científico**, v. 47, p. e14876-e14876, 2024.
- FENG, L. et al. Slow-release fertilizer improves relay maize yield and nitrogen agronomic efficiency by reshaping root traits. **Plant and Soil**, v. 522, p. 819-835, 2026.
- JAN, B. et al. Agronomic Bio-fortification of Rice and Maize with Iron and Zinc: A Review. **International Research Journal of Pure & Applied Chemistry**, v. 21, n. 16, p. 28-37, 2020.
- SOUZA, S. M.; ANDRADE, L. A.; PEREIRA, J. Efficiency of zinc biofortification in rice grains. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 14, n. 1, p. e14272, 2024.