

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
CAMPUS URUGUAIANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL**

**USO SUSTENTÁVEL DO NITROGÊNIO EM PASTAGENS DE AVEIAS
OU AZEVÉM EM SIPAS COM SOJA OU ARROZ NO BIOMA PAMPA**

TESE DE DOUTORADO

LUELI FERNANDES BRAGANÇA

**Uruguaiiana
2026**

LUELI FERNANDES BRAGANÇA

**USO SUSTENTÁVEL DO NITROGÊNIO EM PASTAGENS DE AVEIAS
OU AZEVÉM EM SIPAS COM SOJA OU ARROZ NO BIOMA PAMPA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Medicina Veterinária.

Área de concentração: Produção e Reprodução Animal

Orientadora: Prof^a. Dra. Deise Dalazen Castagnara

**Uruguaiiana
2026**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

B813u Bragança, Lueli Fernandes

Uso sustentável do nitrogênio em pastagens de
aveias ou azevém em SIPA's com soja ou arroz no
Bioma Pampa / Lueli Fernandes Bragança.

134 p.

Tese (Doutorado)-- Universidade Federal do Pampa,
DOUTORADO EM CIÊNCIA ANIMAL, 2026.

"Orientação: Deise Dalazen Castagnara".

1. Agricultura regenerativa. 2. Sistemas
Integrados de Produção Agropecuária. 3. Aveia e
azevém. 4. Produção de forragem. 5. Eficiência do
uso de nitrogênio. I. Título.

LUELI FERNANDES BRAGANÇA

**USO SUSTENTÁVEL DO NITROGÊNIO EM PASTAGENS DE AVEIAS
OU AZEVÉM EM SIPAS COM SOJA OU ARROZ NO BIOMA PAMPA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Animal, da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Medicina Veterinária.

Área de concentração: Produção e Reprodução Animal

Tese defendida e aprovada em 27 de fevereiro de 2026.

Banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
DEISE DALAZEN CASTAGNARA
Data: 23/03/2026 16:04:49-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof^a. Dra. Deise Dalazen Castagnara
Programa de Pós-graduação em Ciência Animal - UNIPAMPA



Documento assinado digitalmente
CLEITON JOSE RAMAO
Data: 22/03/2026 09:51:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Cleiton José Ramão
IRGA- Instituto Rio Grandense do Arroz



Documento assinado digitalmente
MARIANA TRINDADE BARRETO
Data: 23/03/2026 09:00:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Mariana Trindade Barreto
IDR - Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná



Documento assinado digitalmente
RICARDO BATISTA JOB
Data: 23/03/2026 09:24:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Batista Job
IFC- Instituto Federal Catarinense



Documento assinado digitalmente
HENRIQUE DA COSTA MENDES MUNIZ
Data: 23/03/2026 14:25:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique da Costa Mendes Muniz
UNIPAMPA

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade recebida em cada dia para evoluir. Sou grata pela providência Divina agir quando os obstáculos aparecem, colocando pessoas no meu caminho que auxiliaram e auxiliam a jornada terrena.

Agradeço à minha família, Adriel e Isadora por estarem ao meu lado, sempre motivando, auxiliando, durante essa trajetória que foi desafiadora para todos nós.

À minha orientadora Professora Deise, que esteve comigo desde o mestrado até agora auxiliando, tornando os momentos difíceis mais leves para enfrentar com sua tranquilidade e empatia. Serei sempre grata por todos os ensinamentos que servirão tanto para vida acadêmica quanto pessoal.

Ao Cleiton e o IRGA (Instituto Riograndense do Arroz), agradeço pela acolhida desde o mestrado, o apoio e parceria foram essenciais para que esse e tantos outros trabalhos fossem desenvolvidos ao longo desses anos.

Agradeço à toda equipe do GEPEBOL pelo desenvolvimento de trabalhos que proporcionaram enriquecimento de conhecimento técnico. Em especial agradeço à Luiza que sempre esteve ao meu lado na condução dos projetos mesmo quando o trabalho era difícil e a equipe era nós duas.

À UNIPAMPA que foi minha segunda casa desde a graduação, onde conheci pessoas maravilhosas e amigos. Obtive oportunidades de crescimento intelectual e pessoal, grandes mestres que se dedicam para fornecer ensino de qualidade. Especialmente os professores ligados ao PPGCA.

Agradeço à Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa durante o primeiro ano do doutorado e ao grupo CARREFOUR pela bolsa de incentivo nos três anos de execução do doutorado.

Muito obrigada!

RESUMO

Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) contribuem com a sustentabilidade de sistemas produtivos, porém, dependem da produção forrageira e eficiência de uso dos recursos naturais prontamente disponíveis. Assim, objetivou-se estudar sob condições de campo os efeitos das rotações arroz ou soja – pastagem de inverno e cinco doses de nitrogênio (N) (0; 50; 100; 150 kg ha⁻¹) aplicados na forrageira sobre seus parâmetros produtivos, nutricionais e de eficiência de uso do N. Seis ensaios experimentais, dois para cada forrageira (aveia branca, azevém, e aveia preta) foram conduzidos sob blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições. Em cada ensaio, alocou-se a cultura antecessora (soja ou arroz) na parcela e as doses de N (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) nas subparcelas. Para apresentação dos resultados, os ensaios foram agrupados por espécie forrageira e repetidos anualmente (2020 e 2021). Nas culturas antecessoras avaliou-se aporte e parâmetros nitrogenados nos resíduos culturais. Nas pastagens mensurou-se produtividade de matéria seca (PMS), taxa de acúmulo de forragem (TAF), e seu valor nutricional, por meio da proteína bruta (PB), fibras em detergente neutro e ácido (FDA), consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV), nutrientes digestíveis totais (NDT), digestibilidade da matéria seca (DIGMS) e valor relativo da forragem (VRF), bem como a concentração e extração de N na MS, além da eficiência de uso (EUN), eficiência agrônômica (EAN) e a eficiência biológica (EBN) do N na forragem. Arroz aportou mais resíduos culturais que a soja, porém, nesta, os resíduos possuíam teor de N maior, relação C:N menor e aportaram mais N ao sistema. As doses de N elevaram a PB, FDN e FDA, mas reduziram CMSPV, NDT, DIGMS e VRF. Concentração de N na MS da forragem, bem com extração de N aumentaram com as doses de N. Para a aveia branca, azevém e aveia preta as EUN médias foram de 56, 60 e 40%; as EAN médias foram 28, 24 e 15 kg de MS kg de N aplicado⁻¹, e as EBN médias foram de 44, 41 e 34 kg MS kg N absorvido⁻¹, respectivamente. Os SIPAs estudados permitem aporte significativo de resíduos culturais que associados às doses de N sustentam elevadas produções forrageiras, otimizando o uso do N aplicado e permitindo a validação de modelos produtivos ambientalmente sustentáveis para a exploração agropecuária do Bioma Pampa.

Palavras-chave: agricultura regenerativa, *Avena sativa*, *Avena strigosa*, bromatologia, eficiência de uso do nitrogênio, *Lolium multiflorum*, produção de forragem

SUSTAINABLE NITROGEN USE IN OAT OR RYEGRASS PASTURES IN INTEGRATED CROP–LIVESTOCK SYSTEMS WITH SOYBEAN OR RICE IN THE PAMPA BIOME

ABSTRACT

Integrated Crop–Livestock Production Systems (ICLPS) contribute to the sustainability of production systems; however, they depend on forage production and the efficiency of use of available resources. Thus, the objective was to study, under field conditions, the effects of rice or soybean rotations with winter pasture and five nitrogen (N) rates (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹) applied to the forage on its productive, nutritional, and N use efficiency parameters. Six experimental trials—two for each forage species (white oat, annual ryegrass, and black oat)—were conducted in a randomized complete block design with split plots and four replications. In each trial, the preceding crop (soybean or rice) was allocated to the main plots and the N rates (0, 50, 100, and 150 kg ha⁻¹) to the subplots. For result presentation, trials were grouped by forage species and repeated annually (2020 and 2021). In the preceding crops, residue inputs and nitrogen-related parameters of crop residues were evaluated. In the pastures, dry matter yield (DMY), forage accumulation rate (FAR), and nutritional value were measured through crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF), dry matter intake as a percentage of live weight (DMILW), total digestible nutrients (TDN), dry matter digestibility (DMD), and relative forage value (RFV), as well as N concentration and N uptake in forage dry matter, in addition to nitrogen use efficiency (NUE), agronomic efficiency (AE), and biological efficiency (BE) of N in the forage. Rice contributed more crop residues than soybean; however, soybean residues had higher N content, a lower C:N ratio, and contributed more N to the system. Increasing N rates increased CP, NDF, and ADF, but reduced DMILW, TDN, DMD, and RFV. N concentration in forage dry matter and N uptake increased with N rates. For white oat, annual ryegrass, and black oat, mean NUE values were 56, 60, and 40%; mean AE values were 28, 24, and 15 kg DM per kg N applied⁻¹; and mean BE values were 44, 41, and 34 kg DM per kg N absorbed⁻¹, respectively. The studied ICLPS allow significant crop residue inputs which, associated with N rates, sustain high forage production, optimize the use of applied N, and enable the validation of environmentally sustainable production models for agricultural exploitation in the Pampa Biome.

Keywords: regenerative agriculture; *Avena sativa*; *Avena strigosa*; bromatology; nitrogen use efficiency; *Lolium multiflorum*; forage production.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CMSPV – Consumo de Matéria Seca em Percentual do Peso Vivo

DIGMS – Digestibilidade Estimada da Matéria Seca

EAN – Eficiência Agronômica de Nitrogênio

EBN – Eficiência Biológica de Nitrogênio

EUN – Eficiência do Uso de Nitrogênio

FBN – Fixação Biológica do Nitrogênio

FDA – Fibra em Detergente Ácido

FDN – Fibra em Detergente Neutro

MOS – Matéria Orgânica do Solo

MS – Matéria Seca

N – Nitrogênio

NDT – Nutrientes Digestíveis Totais

PB – Proteína Bruta

PMS – Produção de Matéria Seca

PV – Peso Vivo

SIPA – Sistema Integrado de Produção Agropecuária

TAF – Taxa de Acúmulo de Forragem

VRF – Valor Relativo da Forragem

LISTA DE FIGURAS

4. Capítulo 1 – Artigo 1

Fig. 1 - Dados climáticos semanais durante o período experimental, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de Aveia Branca em sucessão ao arroz ou soja, sob doses de nitrogênio, em Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 36

Fig. 2 - Produtividade de matéria seca (PMS: kg ha⁻¹) e taxa de acúmulo de forragem (TAF: kg ha⁻¹ dia⁻¹) em pastagens de Aveia Branca cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 40

5. Capítulo 2 – Artigo 2

Fig. 1 - Dados climáticos semanais durante o período experimental, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de azevém Anual em sucessão ao arroz ou soja e sob doses de nitrogênio, em Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 61

Fig. 2 - Produtividade de matéria seca (MS) (kg ha⁻¹) e taxa de acúmulo de forragem - TAF (kg ha⁻¹ dia⁻¹) em pastagens de Azevém anual, cultivadas em sucessão à soja ou arroz e, fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes, realizados de abril a setembro, nos anos de 2020 e 2021, Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 65

Fig. 3 – Eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Azevém anual, semeadas após lavouras de arroz ou soja e fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil 70

6. Capítulo 3 – Artigo 3

Figura 1. Dados climáticos durante os meses de abril a setembro, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de Aveia Preta semeada após lavoura de arroz ou soja e sob doses de nitrogênio, em Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 89

Figura 2. Produtividade de matéria seca (PMS - kg ha⁻¹) e taxa de acúmulo de forragem (TAF - kg ha⁻¹ dia⁻¹) em pastagens de Aveia Preta, cultivadas em sucessão ao arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, realizados de abril a setembro nos anos de 2020 e 2021, Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 93

Figura 3. Valor nutricional da forragem em pastagens de Aveia Preta fertilizadas com doses de nitrogênio, de abril a setembro nos anos de 2020 e 2021, Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil..... 95

LISTA DE TABELAS

4. Capítulo 1 – Artigo 1

Tab. 1 – Valor nutricional da forragem produzida por pastagens de Aveia Branca fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes (C1, C2 e C3), de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil 41

Tab. 2 – Concentração de e absorção de nitrogênio na forragem produzida por pastagens de Aveia Branca, cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil. 43

Tab. 3 – Eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Aveia Branca cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil 45

5. Capítulo 2 – Artigo 2

Tab. 1 – Valor nutricional da forragem produzida por pastagens de Azevém anual fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil 67

Tab. 2 – Concentração e extração de nitrogênio na forragem produzida por pastagens de Azevém anual, cultivadas em sucessão à soja ou arroz, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.....68

6. Capítulo 3 – Artigo 3

Tabela 1. Concentração e extração de nitrogênio na forragem, eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Aveia Preta, cultivadas em sucessão ao arroz ou soja, e fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil..... 96

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
3. OBJETIVOS	14
3.1 Objetivo geral.....	14
3.2 Objetivos específicos	14
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1 Bioma Pampa Brasileiro	15
2.2 Binômio Arroz-Soja nas terras baixas do Bioma Pampa.....	17
2.3 Plantio direto no Bioma Pampa	18
2.4 Irrigação nas terras baixas do Bioma Pampa	20
2.5 Pecuária no Bioma Pampa	21
2.6 Sistemas integrados de produção agropecuária-SIPAs.....	22
2.7 Aveia e azevém em SIPAs em terras baixas	25
2.8 Valor Nutricional das plantas forrageiras	26
2.9 Adubação Nitrogenada em pastagens	29
2.10 Eficiência do uso do Nitrogênio.....	30
4. CAPÍTULO 1.....	33
5. CAPÍTULO 2.....	57
6. CAPÍTULO 3.....	85
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	113
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	114

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo da população mundial tem intensificado as preocupações com a segurança alimentar e com a capacidade dos sistemas agrícolas em suprir a crescente demanda por alimentos, fibras e energia (Xiong e Lian, 2026; Elkhalfi et al., 2025). Embora os sistemas agrícolas tradicionais tenham promovido expressivos ganhos de produtividade, o modelo de produção fortemente dependente de elevados aportes de insumos externos tem revelado limites ambientais, econômicos e sociais, especialmente frente às mudanças climáticas, à instabilidade geopolítica e às perturbações nos mercados globais de alimentos (Eisa et al., 2025; Cao et al., 2025; Fu et al., 2025). Nesse contexto, a conciliação entre aumento da produção agrícola e preservação dos recursos naturais torna-se um dos principais desafios contemporâneos da agricultura.

Entre os ecossistemas mais vulneráveis a essas pressões destaca-se o Bioma Pampa, localizado no sul da América do Sul e caracterizado por elevada biodiversidade, campos naturais heterogêneos e solos de fertilidade naturalmente baixa (Ricard et al., 2020; Jaurena et al., 2021). No Brasil, embora ocupe apenas cerca de 2,3 % do território nacional, o Pampa abriga aproximadamente 9 % da biodiversidade do país, estando restrito ao sul do Rio Grande do Sul (Andrade et al., 2023; RS, 2024). A intensificação agropecuária tem promovido a conversão da vegetação nativa, com impactos negativos sobre a biodiversidade e sobre funções ecológicas associadas ao solo, à água e ao carbono, reforçando a necessidade de estratégias que conciliem produção e conservação ambiental (Baeza et al., 2022; Milagre et al., 2025).

Nesse cenário, a transição para sistemas agrícolas mais sustentáveis emerge como prioridade global, com foco no aumento da resiliência produtiva e na redução dos impactos ambientais associados ao uso intensivo dos recursos naturais (Xiong e Lian, 2026). Sistemas baseados em práticas conservacionistas, diversificação de culturas e uso racional de insumos têm se mostrado alternativas promissoras (Kang et al., 2024; Liu et al., 2025). Os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) destacam-se nesse contexto por promoverem a reciclagem de nutrientes, a melhoria da fertilidade do solo, o aumento da eficiência do uso da terra e a redução da poluição agrícola, conciliando produtividade e sustentabilidade ambiental (Pereyra-Goday et al., 2022; Cerecetto et al., 2024).

Associado aos SIPAs, o sistema de plantio direto constitui uma base fundamental da agricultura conservacionista, caracterizando-se pela mínima perturbação do solo, manutenção da cobertura vegetal e diversificação de culturas (Batista et al., 2026; Possamai et al., 2022). Nas terras baixas do Bioma Pampa, tradicionalmente ocupadas pelo cultivo de arroz irrigado, a

rotação arroz–soja tem sido adotada como estratégia para reduzir custos e melhorar a fertilidade do solo (Denardin et al., 2019; Santos et al., 2022). Entretanto, a predominância de culturas de verão resulta em extensos períodos de pousio no inverno, configurando uma oportunidade para a introdução de pastagens de inverno em sistemas integrados.

Nesse contexto, as aveias (*Avena sativa* L. e *Avena Strigosa*) e o azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.) destacam-se como forrageiras estratégicas, capazes de suprir o vazio forrageiro no outono-inverno, aumentar a produção animal e contribuir para a sustentabilidade dos SIPAs (Tiecher et al., 2020; Souza et al., 2025). O cultivo dessas espécies proporciona benefícios como aumento dos estoques de carbono no solo, melhoria da estrutura e da atividade biológica, liberação gradual de nutrientes e redução da compactação e da erosão do solo, além de elevado valor nutricional e alta produção de massa seca (Blanco-Canqui e Ruis, 2020; Fontana et al., 2024; Hahn et al., 2024).

O nitrogênio é um dos principais nutrientes limitantes da produtividade vegetal e da qualidade das forragens, sendo essencial para o crescimento das plantas e o desempenho animal (Berger et al., 2020; Ardeni et al., 2022). Em pastagens, a adubação nitrogenada promove aumentos significativos na produção de biomassa e no teor de proteína bruta, refletindo diretamente no consumo e no ganho de peso dos animais (Mahmoud et al., 2022; Zhuang et al., 2022). Contudo, a eficiência de uso do nitrogênio nos sistemas agrícolas ainda é baixa, em razão de perdas por volatilização, lixiviação e emissões de gases de efeito estufa, sobretudo quando o manejo é inadequado (Zhang et al., 2021; Zhang et al., 2025).

Assim, estratégias integradas de manejo que visem aumentar a eficiência do uso do nitrogênio (NUE), como a adequada definição de doses, fontes e épocas de aplicação, associadas à integração lavoura–pecuária, são fundamentais para reduzir impactos ambientais, otimizar o uso de fertilizantes e aumentar a resiliência dos agroecossistemas (Bastidas et al., 2024; Denardin et al., 2020). Nesse sentido, estudos que avaliem o manejo do nitrogênio em pastagens de inverno inseridas em sistemas integrados nas terras baixas do Bioma Pampa são essenciais para subsidiar práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis, alinhadas às demandas contemporâneas de produção de alimentos e conservação dos recursos naturais.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Promover a preservação do Bioma Pampa por meio da intensificação da produção em áreas de terras baixas da Fronteira Oeste, manejadas em rotação com arroz e soja, irrigados por aspersão com pivô central, mediante a adoção da integração lavoura-pecuária, do sistema de plantio direto, cultivo de sequeiro e uso eficiente de adubação nitrogenada em pastagens hibernais.

3.2 Objetivos específicos

- Analisar o uso da adubação nitrogenada mineral em aveia branca, aveia preta e azevém na implantação de um Sistema Integrado de Produção Agropecuária (SIPA), cultivadas em sequeiro, sob sistema de plantio direto em rotação com arroz e soja irrigadas por aspersão no verão.
- Avaliar a eficiência de produção de forragem de aveia branca, aveia preta e azevém cultivadas em sucessão aos cultivos de soja ou arroz.
- Avaliar o desempenho produtivo de pastagens de aveia branca, aveia preta e azevém submetidas a diferentes doses de nitrogênio, cultivadas sem irrigação e em sucessão à soja ou arroz.
- Avaliar o valor nutricional de aveia branca, aveia preta e azevém submetidas a diferentes doses de adubação nitrogenada, cultivadas em um SIPA após os cultivos de soja ou arroz.
- Determinar a eficiência do uso do nitrogênio, a eficiência agronômica e a eficiência biológica do nitrogênio após adubação em pastagens de aveia branca, aveia preta e azevém em um SIPA em sucessão aos cultivos de soja ou arroz.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioma Pampa Brasileiro

O termo “Pampa” tem origem no quéchua, língua indígena sul-americana dos Incas, e significa “planície aberta e plana” (Campoli e Stivali, 2026). Localizado no sul da América do Sul (Olle et al., 2024) o Bioma Pampa é um ecossistema que está presente no Uruguai, sul do Brasil e centro-leste da Argentina (Baeza et al., 2022). Suas planícies eram originalmente cobertas por campos naturais, moduladas ao longo de milênios por uma combinação de precipitação, temperatura e pequenos gradientes topográficos (Ricard et al., 2020), resultando em uma ampla região ecológica, com vasta biodiversidade vegetal e animal que o tornam único no mundo (Jaurena et al., 2021).

Devido à estas características, a cobertura vegetal dos campos no bioma Pampa é geralmente baixa, e muitas espécies vegetais apresentam características funcionais associadas à sobrevivência em condições ambientais locais extremas, suportando estresse hídrico e solos arenosos altamente porosos (Pillar e Lange, 2015). Esses campos são caracterizados por um alto grau de biodiversidade (Andrade et al., 2023) e distinguem-se por elevados níveis de heterogeneidade edáfica, composicional e fisionômica (Hasenack et al., 2023).

A flora apresenta um número significativo de espécies endêmicas, com numerosas adaptações morfofisiológicas (Webber et al., 2023), com predominância de pastagens naturais temperadas e subtropicais espacialmente heterogêneas (Andrade et al., 2018). As famílias botânicas com maior riqueza de espécies no bioma Pampa são Asteraceae, Poaceae, Fabaceae, Euphorbiaceae, Cyperaceae, Rubiaceae e Myrtaceae (Webber et al., 2023). Entretanto, apesar de conhecido por seus campos naturais, a paisagem da região do Pampa é composta por mosaicos de vegetação, com a presença de formações arbóreas, arbustivas e campestres, especialmente próximas aos cursos d’água (Milagre et al., 2025). Nessa vegetação florestal destacam-se as florestas ripárias sazonais, florestas de encosta de baixa altitude, fragmentos florestais em mosaico com áreas campestres (Bergamin et al., 2024), formações lenhosas (arbustais) e parques naturais, como os palmares de butiá (*Butia* spp., Arecaceae) e os parques de espinilho, associados à Província do Espinal argentino (Uruth et al., 2024).

Em se tratando da fração brasileira do Bioma Pampa, este cobre 2,3% da superfície do Brasil, mas abriga cerca de 9% de sua biodiversidade total (Andrade et al., 2023). No Brasil, a ocorrência do Bioma Pampa é restrita ao Rio Grande do Sul, onde recobre a metade meridional do estado se estendendo por 68,8% (193.836 km²) do território gaúcho (RS, 2024).

Um novo termo também utilizado para descrição dos campos do Bioma Pampa é Campos Sulinos, porém, estes compreendem além da fração gaúcha do Bioma Pampa, também as áreas campestres do sul da Mata Atlântica (Overbeck et al., 2024). São ecossistemas campestres altamente biodiversos, caracterizados por invernos frios e pela possibilidade de ocorrência de geadas (RS, 2024). Caracterizam-se por vegetação herbácea composta por gramíneas, ervas e pequenos arbustos, formando mosaicos com florestas de araucária e florestas ripárias em parte de sua extensão (Michel et al., 2026). O clima é subtropical úmido, com precipitação anual variando entre 1.200 e 2.000 mm e temperaturas médias entre 16 e 20 °C (Michel et al., 2026). Os solos apresentam fertilidade naturalmente baixa, sendo alguns rasos, incluindo Neossolos Litólicos e Regolíticos, Latossolos, Argissolos e Gleissolos (Pillar e Lange, 2015).

Embora compreenda áreas campestres da Mata Atlântica além do Bioma Pampa, os campos sulinos são explorados antropicamente com as mesmas finalidades estando sujeitos à mesma intensidade de degradação. No Bioma Pampa, atualmente a vegetação nativa cobre apenas 45% do território (Milagre et al 2025), e 44% das florestas foram removidas (Campoli e Stivali, 2026). A intensificação do uso da terra, incluindo a conversão para lavouras, e a invasão por espécies exóticas, como *Eragrostis plana* Ness (Capim Annoni), têm causado perdas significativas de diversidade e de funções ecológicas (Krob et al., 2021). De acordo com o MapBiomias (2025), a região do Pampa perdeu aproximadamente 26,4% de sua vegetação campestre entre 1985 e 2022, o que corresponde a cerca de 3,9 milhões de hectares.

Processos semelhantes ocorreram na Argentina e Uruguai, e essa intervenção antrópica modificou historicamente estruturas e funções originais do Bioma Pampa, dando origem a um ecossistema novo, reorientado para a produção de alimentos, fibras e bioenergia (Ricard et al., 2020). Estas mudanças tornaram o Bioma Pampa um dos hotspots globais de mudanças no uso da terra (Baeza et al., 2022), ou seja, uma das regiões do mundo onde estão acontecendo as maiores mudanças em maior velocidade (Bardelle et al., 2025).

Como essas mudanças ameaçam os recursos de solo e água, bem como a biodiversidade, em um bioma que armazena grandes quantidades de carbono e sustenta ecossistemas únicos (Andrade et al., 2023), estudos que contemplem a exploração sustentável do Bioma Pampa são relevantes para a preservação deste ecossistema. Inevitavelmente, as funções ecológicas associadas ao carbono e à água foram profundamente modificadas pela intervenção antrópica; contudo, práticas de conservação e a incorporação de tecnologias nas últimas décadas atenuaram e até mesmo reverteram as tendências negativas mais marcantes (Ricard et al., 2020).

2.2 Binômio Arroz-Soja nas terras baixas do Bioma Pampa

Os sistemas pecuários têm sido a principal forma de exploração econômica dos campos naturais do bioma Pampa (Viana et al., 2023). No entanto, desde o final do século XX, a América do Sul tem experimentado uma expansão significativa da agricultura sobre áreas de campos naturais, especialmente no Bioma Pampa (Foucher et al., 2023). Essas áreas mecanizáveis do Bioma Pampa que passaram a ser exploradas economicamente pela agricultura são denominadas de terras baixas.

Essas áreas abrangem mais de 5,4 milhões de hectares no estado do Rio Grande do Sul e historicamente são exploradas com o cultivo de arroz irrigado alternado com sistemas extensivos de pecuária (Giacomeli et al., 2022). Os ambientes de terras baixas na região Sul do Brasil são caracterizados por solos hidromórficos, que apresentam pouca profundidade, drenagem deficiente, baixa fertilidade natural, elevados teores de argila e silte e compactação inerente do solo, fatores que impõem desafios ao desenvolvimento de culturas com sistema radicular profundo (Zang et al., 2022; Hasenack et al., 2023).

As características edafoclimáticas das terras baixas favorecem a produção de arroz irrigado, tornando o Brasil o maior produtor de arroz fora da Ásia, com uma produção anual de 11 milhões de toneladas, dos quais 80% são produzidos em ambientes de terras baixas no sul do Brasil (IBGE, 2026). O sistema de produção de arroz nessa região tem apresentado um aumento gradual nos níveis de produtividade ao longo das últimas décadas, parcialmente atribuído a um significativo incremento no uso de insumos externos, o que tem elevado os custos de produção (Ribas et al., 2020). Para enfrentar o desafio da baixa rentabilidade da rizicultura no sul do Brasil, tornou-se necessária a diversificação dos sistemas de produção, como a adoção do sistema de rotação arroz-soja (Santos et al., 2022).

A inclusão de espécies leguminosas como a soja em rotações de culturas pode aumentar o suprimento de N em solos com limitação desse nutriente, como os arrozais, além de melhorar a produtividade do arroz (Denardin et al., 2019). Especificamente, a rotação arroz-soja durante a safra de verão tem sido amplamente adotada para o controle de plantas daninhas, pragas e doenças, ao mesmo tempo em que promove a melhoria da fertilidade do solo, aumenta a disponibilidade de N e reduz os riscos de erosão (Bowles et al., 2020; Zhao et al., 2020).

O cultivo de soja em terras baixas expandiu-se, ocupando 45% da área anteriormente destinada ao arroz irrigado entre 2009 e 2022 (Silva et al., 2022). A crescente adoção de sistemas de rotação arroz-soja em ambientes de terras baixas, cada um com requisitos de

manejo distintos, apresenta desafios significativos. O cultivo de arroz prospera sob condições de alagamento e requer relativamente baixos aportes de fósforo (P) e potássio (K), em razão do aumento da disponibilidade de nutrientes promovido pelos processos dinâmicos de oxirredução induzidos pelo alagamento do solo (Shaheen et al., 2022). Em contraste, o cultivo da soja demanda solos bem drenados, a aplicação de calcário para mitigar a acidez predominante, a correção da toxicidade por alumínio, manganês e ferro, além de níveis moderados a elevados de fósforo e potássio para alcançar produtividades ótimas (Giacomeli et al., 2022).

Ainda, as propriedades físicas do solo que favorecem os arrozais podem aumentar o risco tanto de excesso quanto de déficit hídrico, ao limitar a aeração do solo e a disponibilidade de água, reduzindo assim a produtividade da soja em terras baixas (Gubiani et al., 2018). Dessa forma, estratégias de cultivo, como a escarificação do solo, o uso de camalhões elevados (*raised seedbeds*) ou a utilização de sulcadores na linha de semeadura (Giacomeli et al., 2017), podem criar condições mais favoráveis ao desenvolvimento da soja, elevando sua produtividade a níveis próximos aos obtidos em áreas de terras altas (Giacomeli et al., 2022).

Mesmo com os desafios existentes, a rotação arroz–soja durante a estação de verão tem sido amplamente adotada para o controle de plantas daninhas, pragas e doenças, ao mesmo tempo em que melhora a fertilidade do solo, aumenta a disponibilidade de nitrogênio por meio da fixação biológica e reduz os riscos de erosão (Denardin et al., 2025). A superação destes desafios não somente beneficia as culturas da soja e do arroz como também pode beneficiar culturas subsequentes a serem introduzidas nos sistemas de rotação, como as pastagens de inverno.

2.3 Plantio direto no Bioma Pampa

O sistema de plantio direto teve origem no Brasil na década de 1970 como uma inovação agrícola centrada na prática do plantio direto, onde era realizada a semeadura direta das culturas sem o revolvimento prévio do solo, mantendo-se a cobertura superficial com resíduos culturais ou palhada (Batista et al., 2026). Ao longo do tempo, essa prática evoluiu para um sistema de manejo conservacionista mais amplo, cujos princípios incluem a diversificação de culturas por meio de esquemas de rotação, a preservação da cobertura do solo com resíduos vegetais ou plantas de cobertura e a mínima perturbação mecânica do solo (Possamai et al., 2022).

Essas características tornaram o plantio direto uma prática agrícola sustentável eficaz, principalmente devido às suas vantagens na redução da erosão do solo, na melhoria da estrutura

e da fertilidade do solo e na economia de mão de obra e recursos financeiros, quando adotado sob condições adequadas (Mondal e Chakraborty, 2022). Sua importância é evidenciada pela adoção em aproximadamente 210 milhões de hectares de terras agrícolas em todo o mundo, correspondendo a cerca de 14% da área agrícola global (Jayaraman et al., 2024). Esses benefícios comprovados têm impulsionado sua rápida expansão em escala mundial (Yan et al., 2026).

No Bioma Pampa, a expansão das áreas agrícolas e as mudanças nas práticas agrícolas, de um sistema convencional baseado no preparo do solo para um sistema agrícola baseado no plantio direto, tiveram início na década de 1990 e se intensificaram no início dos anos 2000, com o objetivo de reduzir a degradação e a erosão do solo (Bardelle et al., 2025). Essa mudança foi viabilizada pela redução do custo dos herbicidas, juntamente com a introdução de culturas geneticamente modificadas resistentes a herbicidas (Merotto et al., 2022).

No entanto, a implementação do PD não constitui uma “solução única para o sucesso”, e a sustentabilidade de seus benefícios ecológicos e produtivos depende fortemente das condições regionais e das práticas de manejo aplicadas (Yan et al., 2026). Destas, destacam-se a ausência de revolvimento do solo (Batista et al., 2026), rotação de culturas (Yan et al., 2026) e a manutenção da cobertura do solo (Batista et al., 2026).

Pesquisas têm demonstrado que a implementação do SPD promove melhorias significativas nas propriedades químicas do solo (Marafon et al., 2020), nos atributos biológicos (Rieff et al., 2020) e nos atributos físicos, como a porosidade (Mondal e Chakraborty, 2022) e a formação dos agregados (Velooso et al., 2019). A diversificação de culturas obtida por meio da rotação e do uso de plantas de cobertura aumenta a heterogeneidade dos resíduos vegetais presentes na superfície do solo (Batista et al., 2026). Estes, por serem constituídos de materiais com diferentes qualidades e estágios de decomposição favorecem a coexistência de uma biota edáfica diversificada, incluindo organismos como as minhocas, que modificam a estrutura do solo (Rodríguez et al., 2025).

A diversificação também altera a estrutura e a atividade das comunidades microbianas, com efeitos positivos sobre a formação e a estabilidade de agregados por meio da produção de agentes ligantes do solo, como hifas fúngicas, glomalina e polissacarídeos (Batista et al., 2026). Outros estudos demonstram que diferentes composições de plantas podem influenciar o balanço de carbono, a qualidade química dos resíduos vegetais, a formação de agregados, a estrutura da comunidade microbiana (Gentsch et al., 2024) e a composição dos organismos do solo (Batista et al., 2023).

Entretanto, quando não conduzido sob todos os princípios o plantio direto pode ocasionar problemas como compactação do solo e acidificação do solo, disseminação de pragas e doenças (Betancur-Corredor et al., 2022), dificuldades no manejo de plantas daninhas e estratificação de nutrientes no solo (Lv et al., 2023), o que pode resultar em redução da produtividade das culturas (Chen et al., 2024). Apesar da adoção de práticas como rotação de culturas e uso de plantas de cobertura para contrabalançar as limitações do PD de longo prazo, os problemas subjacentes persistem, indicando que essas causas fundamentais exigem manejo contínuo e sistemático (Yan et al., 2026).

Contrastando com o cultivo do arroz irrigado, a implantação de sistemas de plantio direto requer o cultivo das culturas em sequeiro, sem o uso da irrigação por inundação. No Bioma Pampa predominam as terras baixas, cujas principais características dos solos que dificultam a implantação de culturas de sequeiro são o hidromorfismo, a presença de uma camada subsuperficial compactada e a reduzida espessura da camada superficial do solo (Goulart et al., 2020), o que resulta em solos com baixa drenagem natural e baixa capacidade de armazenamento de água (Rocha et al., 2017).

Para que culturas de sequeiro como a soja e o milho tenham sucesso nesse tipo de ambiente, é necessário melhorar as propriedades físicas do solo, de modo a promover a drenagem do excesso de água e, ao mesmo tempo, garantir a disponibilidade hídrica às plantas, especialmente em estádios críticos de crescimento e desenvolvimento das culturas (Gubiani et al., 2018).

Para assegurar o aumento da produtividade e da rentabilidade econômica das culturas de sequeiro em terras baixas, é fundamental a adoção de um manejo adequado que respeite as propriedades intrínsecas desses solos. A rotação de culturas e o uso de cultivares tolerantes a condições de alagamento são outras práticas que permitem maior retorno econômico e sustentabilidade do sistema (Goulart et al., 2020).

2.4 Irrigação nas terras baixas do Bioma Pampa

Diferentes métodos de irrigação são indicados para evitar o estresse hídrico das culturas e assegurar maiores rendimentos. No arroz cultivado em terras baixas na América do Sul, a grande maioria (>95%) das áreas de arroz irrigado ainda utiliza sistemas de irrigação por inundação contínua (Buss et al., 2026). Esse modelo de irrigação mantém uma lâmina d'água

constante sobre o solo, visando não somente atender à demanda hídrica da cultura, mas também o controle de plantas daninhas.

Porém, a adoção de culturas de sequeiro como a soja e o milho requer adaptações no modelo adotado para a irrigação. Para essas culturas o método de irrigação por superfície constitui uma alternativa de baixo custo e permite a utilização das mesmas estruturas empregadas no cultivo de arroz irrigado, já disponíveis nessas áreas. No entanto, para garantir uma aeração mínima do solo, pode ser necessário o uso de camalhões elevados para o cultivo da soja nesse ambiente, mesmo quando se utiliza a irrigação por superfície (Gubiani et al., 2018).

Entretanto, ao ser adotado o sistema de plantio direto como modelo de cultivo, a irrigação por inundação não é possível de ser implantada. Nesse contexto, a irrigação por aspersão com pivô central possibilita o cultivo de culturas de terras altas em sistema de plantio direto nas terras baixas, em rotação com o arroz. Além disso, o uso do pivô central demanda menor mão de obra e apresenta maior eficiência no uso da água em comparação aos métodos de irrigação por superfície (Sánchez-Llerena et al., 2016). Essas adaptações são necessárias porque a região do Bioma Pampa possui clima semiárido com regime pluviométrico irregular (Malaguez et al., 2017), portanto, requer alguma estratégia de irrigação para expressão do potencial máximo das culturas.

Ainda, a adoção de novas técnicas de irrigação em substituição à irrigação por inundação com formação de lâmina d'água contribuem não somente para a redução no consumo hídrico ao longo do ciclo das culturas. Sistemas alternativos, como irrigação por aspersão em pivô central, microsulcos, substituição da lâmina d'água pela saturação do solo, também contribuem com uma menor emissão de gases do efeito estufa, principalmente o metano (Buss et al., 2026).

2.5 Pecuária no Bioma Pampa

Dos ecossistemas mundiais, os dominados por pastagens correspondem à cerca de 30%–40% da superfície terrestre e aproximadamente 20%–30% dos trópicos (Boughton et al., 2025). Na maioria dos países da América do Sul, as pastagens constituídas por campos nativos constituem o principal uso da terra (Baeza e Paruelo, 2020), e também são a base da produção pecuária (Paruelo et al., 2022). Essa realidade inclui as áreas dos Pampas e Campos do sul da América do Sul (Modernel et al., 2018), onde os sistemas de criação de gado bovino com

pastoreio em pastagens nativas são a principal atividade pecuária desenvolvida (Paramborda et al., 2023). Nestas pastagens, também chamadas de campos nativos, desenvolve-se a produção pecuária extensiva (Moraes et al., 2019), com predominância da bovinocultura de corte (Schneider et al., 2024).

Entretanto, a região possui clima com estação fria bem definida, caracterizada pela redução do fotoperíodo, temperaturas baixas e ocorrência de geadas (Peretti et al., 2017), que associado ao clima semiárido com regime pluviométrico irregular (Malaguez et al., 2017), limitam a produção e qualidade de forrageiras tropicais). Essa característica climática faz com que a produtividade (Garcez et al., 2023) e valor nutricional (Bragança et al., 2024) destes campos se concentrem na primavera e verão (Moreira et al., 2019).

Assim, devido às baixas temperaturas (Maggi et al., 2024), redução da luminosidade (Bragança et al., 2024) e escassez hídrica, por pertencerem ao ciclo de crescimento C₄ (Cruz et al., 2019), as pastagens nativas têm seu crescimento restringido no período de outono-inverno (Azevedo et al., 2024), restringindo o desempenho animal neste período.

Paralelamente, novas pressões na atividade pecuária decorrentes dos custos de produção, da valorização da terra e das restrições sociais e ambientais (Cortner et al., 2019; Nunes et al., 2019; Wetlesen et al., 2020) têm conduzido os pecuaristas à adoção de novas tecnologias de produção (Malafaia et al., 2021), para atender à crescente demanda nacional e internacional por carne de alta qualidade (Pistillo et al., 2025).

Para esta intensificação, dentre as principais estratégias adotadas destacam-se os sistemas integrados de produção, novas forragens, melhoramento genético do rebanho, boas práticas de produção, manejo e recuperação de pastagens, produção precoce de bezerros e suplementação alimentar. A adoção destas tecnologias pode aumentar significativamente a eficiência, a sustentabilidade e a lucratividade, uma vez que, a produção de carne bovina é dependente das estratégias de manejo e das fontes nutricionais (Baruselli et al., 2025).

2.6 Sistemas integrados de produção agropecuária-SIPAs

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estabeleceu a ambiciosa meta de alcançar a “Fome Zero” até 2030, refletindo um forte compromisso global com a segurança alimentar (Xiong e Lian, 2026). Os sistemas alimentares contemporâneos enfrentam pressões crescentes decorrentes das mudanças climáticas, de perturbações no comércio e da instabilidade geopolítica, fatores que têm comprometido a

produção agrícola (Elkhalfi et al., 2025). Paralelamente, as limitações de um modelo de desenvolvimento agrícola fortemente dependente de elevados insumos de recursos tornam-se cada vez mais evidentes (Xiong e Lian, 2026).

Embora os sistemas agrícolas tradicionais tenham desempenhado um papel fundamental no aumento da produtividade e na redução dos déficits de oferta de alimentos (Eisa et al., 2025), promover a transformação dos sistemas agrícolas e fortalecer sua resiliência tornou-se uma prioridade urgente para enfrentar os novos desafios da segurança alimentar em escala global (Cao et al., 2025; Fu et al., 2025). Nesse contexto, uma das alternativas passíveis de adoção para aumento da resiliência é a adoção dos sistemas integrados de produção agropecuária SIPAs.

Estes permitem conciliar o desenvolvimento ambientalmente sustentável com a produtividade e abrangem tanto a configuração espacial entre cultivos agrícolas e criação animal quanto modelos produtivos específicos adotados pelos agricultores (Xiong e Lian, 2026). Por meio de sua adoção, dentre os principais benefícios possíveis de serem obtidos destacam-se a melhora significativa na eficiência do uso de recursos, redução da poluição agrícola e aumento da renda dos produtores (Liu et al., 2025). Esses avanços na produtividade agrícola e a segurança nutricional são possíveis porque os SIPAs promovem a reciclagem de nutrientes, melhoram a fertilidade do solo e reduzem a dependência de fertilizantes químicos (Kang et al., 2024), aliviando, assim, a crescente competição por terra e grãos entre a alimentação humana e a produção animal (Oliveira et al., 2024).

Além dos ganhos em eficiência produtiva, diversifica as fontes de renda, fortalece os meios de subsistência (Swastika et al., 2024) e contribui com a nutrição das famílias rurais. Esses benefícios são obtidos por meio da melhora da diversidade alimentar e dos indicadores de saúde, especialmente em regiões economicamente mais vulneráveis (Prado et al., 2025), aumentando a resiliência frente a choques econômicos e climáticos (Swastika et al., 2024).

Em se tratando dos benefícios ao solo, as práticas agrícolas conservacionistas adotadas nas SIPAs, que alternam temporalmente o cultivo de grãos e a produção pecuária na mesma área, são consideradas estratégias sustentáveis para promover a resiliência agrícola, ao mesmo tempo em que mantêm altos rendimentos das culturas (Cerecetto et al., 2024). Isso pode ser alcançado por meio de rotações lavoura-pastagem, que aumentam a diversidade da paisagem, melhoram a eficiência do uso da terra, a produtividade agrícola e pecuária, e reduzem a erosão e a degradação do solo (Pereyra-Goday et al., 2022).

A diversificação de culturas, combinando leguminosas fixadoras de nitrogênio e cereais na rotação, é outro fator crucial que influencia a ciclagem de carbono (C) e nitrogênio (N) em

solos agrícolas (Cerecetto et al., 2024). A entrada de nutrientes orgânicos, seja por meio da urina e das fezes dos animais ou pelos resíduos culturais, proporciona benefícios ambientais ao sistema lavoura-pastagem, como aumento da fertilidade do solo, sequestro de carbono e melhoria das propriedades físico-químicas (Pereyra-Goday et al., 2022).

Os benefícios proporcionados pelos SIPAs são conectados com os princípios da agricultura regenerativa (Romanoski et al., 2025). Este conceito é uma abordagem sistêmica voltada à restauração dos recursos naturais, por meio da promoção da saúde do solo, da biodiversidade e da sustentabilidade social e ambiental (Garbisu et al., 2025). Ela se fundamenta em uma agricultura produtiva, resiliente ao clima e eticamente comprometida, que contribui para a provisão de serviços ecossistêmicos e para a manutenção do espaço operacional seguro do sistema terrestre (Garbisu et al., 2025). Assim, práticas aplicadas em SIPAs como o plantio direto, a manutenção da cobertura do solo, a rotação de culturas, o uso de adubos verdes, o pastejo manejado intensivamente e a integração lavoura-pecuária são fundamentais para sustentar esses princípios e fortalecer sistemas de produção mais equilibrados (Ahmed et al., 2024).

Os sistemas de pastejo adotados nos SIPAs podem representar ativos importantes e ser compreendidos não apenas como processos produtivos, mas também como provedores de múltiplos serviços ecossistêmicos, além da produção de alimentos (Hercher-Pasteur, et al., 2026). Essa contribuição da presença do animal é reforçada pela capacidade que os ruminantes possuem de valorizar forragens, convertendo-as em proteína de alto valor biológico para a nutrição humana, o que estimula a integração desse tipo de cobertura vegetal em rotações de culturas (Bai e Cotrufo, 2022). Ainda, os efeitos intrínsecos dos animais, por meio dos seus dejetos, impulsionam a mineralização da matéria orgânica (Assmann et al., 2017).

A introdução de animais em pastejo em áreas anteriormente não pastejadas altera a quantidade e a qualidade dos compostos orgânicos no solo (Lemaire et al., 2023). Esses processos intensificam a atividade microbiana e melhoram a estrutura do solo (Ologunde et al., 2024), além de favorecer maior ciclagem de nutrientes e sua absorção pelas plantas (Lemaire et al., 2023). Por este motivo, em áreas pastejadas, mesmo havendo grande aporte de resíduos culturais, ocorre uma conversão mais rápida dos resíduos orgânicos em produção primária devido à maior intensidade de mineralização e maior eficiência no uso de recursos nos SIPAs, incluindo nutrientes e água (Carvalho et al., 2024).

Entretanto, apesar de todos os benefícios, a implantação de SIPAs em terras baixas cultivadas com arroz irrigado é um desafio, devido principalmente às características dos solos. Estes tendem a ter reduzida taxa de infiltração de água, baixa macrosporosidade e elevada

compactação próximo da superfície, o que dificulta a inserção de outras culturas (Denardin et al., 2019). Embora a aplicação de modelos de SIPA tenham potencial para mitigar problemas ambientais e atender a demanda de consumo e desenvolvimento econômico, são necessários mais estudos quanto a aplicação de ferramentas e estratégias sustentáveis levando em conta as características edafoclimáticas das diferentes regiões do país (Carmona et al., 2018).

2.7 Aveia e azevém em SIPAs em terras baixas

O arroz é a principal cultura cultivada em terras baixas, porém, a soja vem ocupando espaço anualmente nessas áreas de cultivo visando a rotação de culturas. No entanto, ambas são culturas de verão, e muitas destas áreas permanecem em pousio durante o inverno quando poderiam ser ocupadas por culturas estivais (Siqueira et al., 2025). Destas, em SIPAs já estabelecidos em terras altas da região Sul do Brasil, a aveia e o azevém são os cereais de inverno mais adotados com significativos benefícios ao sistema como um todo.

Seu cultivo proporciona o aumento dos estoques de carbono no solo (Tiecher et al., 2020) e da atividade biológica (Fontana et al., 2024), a liberação gradual dos nutrientes acumulados em sua biomassa (Hahn et al., 2024), o acesso a formas de nutrientes de baixa disponibilidade, como o fósforo (P) (Tiecher et al., 2020), o aumento da disponibilidade de nitrogênio (N) por meio de espécies leguminosas, a melhoria da estabilidade de agregados e da macroporosidade do solo (Blanco-Canqui e Ruis, 2020), além da redução da compactação do solo (Quintarelli et al., 2022) e da erosão hídrica (Wolschick et al., 2021). Embora as pesquisas já estejam consolidadas para as regiões de terras altas, em terras baixas, informações técnicas e científicas ainda são escassas, especialmente para seu cultivo em sistema de plantio direto.

A aveia (*Avena sativa* L.) é uma cultura forrageira de inverno de grande importância (Bharti et al., 2024) e amplamente cultivada como fonte alimentar para ruminantes (Liu et al., 2025). Entre os cereais mais cultivados no mundo, a aveia ocupa a sexta posição mundial em produção, atrás apenas de trigo, milho, arroz, cevada e sorgo devido à suas características excepcionais na produção forrageira (Priyanka et al., 2022).

Crescimento rápido e vigoroso, potencial para múltiplos cortes, rápida e elevada capacidade de rebrota, elevada densidade foliar a tornam predominante em sistemas de produção pecuária sustentáveis, podendo ser cultivada em condições irrigadas ou de sequeiro disseminando-se para todas as regiões do mundo (Rajesh et al., 2022; Rana et al., 2022; Bharti et al., 2024; Liu et al., 2025). A cultura ainda é pouco disseminada, sob a crença de seu

subdesenvolvimento em solos de Terras Baixas. Porém, devido ao seu potencial produtivo e precocidade de pastejo em relação ao azevém, é uma alternativa promissora para alimentação dos rebanhos no vazio forrageiro outonal (Malaguez et al., 2017).

O azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.), comumente conhecido como azevém italiano, é uma forrageira de inverno amplamente cultivada em diversas regiões do mundo (Souza et al., 2025). Seu cultivo está disseminado na África, no sul e sudeste da Austrália e em países da América do Sul (Ojeda et al., 2018), apresentando grande importância econômica para os sistemas de produção de animais a pasto (Souza et al., 2025).

Nos campos subtropicais brasileiros é uma das forrageiras mais utilizadas (Furquin et al., 2025), tornando a Região Sul a maior produtora de azevém anual (Confortin et al., 2013). Devido à sua elevada qualidade forrageira, alta capacidade de perfilhamento e baixos custos de produção (Bohn et al., 2020), e potencial de ressemeadura natural (Furquin et al., 2025), é cultivado para suplementação forrageira durante os meses frios (Souza et al., 2025), promovendo o aumento da oferta de forragem no período de menor crescimento das forrageiras tropicais (Pezzopane et al., 2018; Cezimbra et al., 2021). Seu cultivo é realizado em rotação ou sucessão as culturas de grãos (Souza et al., 2025), consorciada com outras gramíneas C₃ ou leguminosas, ou ainda sobressemeada em campos naturais (Coelho et al., 2020) onde aumenta o teor de proteína bruta da forragem ofertada aos animais (Souza et al., 2025). A inclusão do azevém nas áreas de terras baixas após a colheita do arroz irrigado é uma prática usual, pois o mesmo destaca-se entre as espécies mais adaptadas, pois apresenta elevado potencial de produção de massa no sistema de rotação em áreas de várzea (Coelho et al., 2020). Entretanto, resultados de pesquisa para seu cultivo em sucessão ao arroz em sistema de plantio direto ainda são incipientes.

2.8 Valor Nutricional das plantas forrageiras

O valor nutricional de uma forragem é determinado pela sua composição química e pela eficiência com que seus constituintes podem ser aproveitados pelos animais para a produção de energia e sua conversão em desempenho animal. Dessa forma, a avaliação nutricional de espécies forrageiras requer uma abordagem integrada que considere simultaneamente a composição química, a digestibilidade e a presença de compostos secundários capazes de interferir na ingestão e no aproveitamento dos nutrientes (De Macêdo Carvalho et al., 2021).

A caracterização química da forragem envolve a determinação dos teores de matéria seca (MS), matéria orgânica (MO), matéria mineral (MM), proteína bruta (PB), extrato etéreo (EE), fibra em detergente neutro (FDN), fibra em detergente ácido (FDA) e lignina. A MS representa a fração do alimento isenta de água e concentra todos os nutrientes disponíveis ao animal, sendo, portanto, um parâmetro fundamental para a avaliação nutricional. A partir da MS, é possível fracionar a forragem em MO, que contém os compostos orgânicos com potencial energético, e MM, constituída pelos minerais essenciais à nutrição animal.

Com base na composição química, podem ser realizadas estimativas que auxiliam na avaliação do valor nutricional das forragens. Entre essas estimativas, destacam-se os teores de carboidratos totais (CHOT), carboidratos não fibrosos (CNF) e carboidratos estruturais (CE), conforme proposto por Sniffen et al. (1992). Além disso, parâmetros relacionados ao consumo voluntário, como o consumo de matéria seca expresso em percentual do peso vivo (CMSPV), podem ser estimados a partir dos teores de FDN (Mertens et al., 1997). Da mesma forma, a digestibilidade da matéria seca (DIGMS) e os nutrientes digestíveis totais (NDT) podem ser estimados com base nos valores de FDA (Bolsen, 1996), assim como o valor relativo da forragem (VRF), que combina estimativas de digestibilidade e ingestão (Bolsen, 1996).

A proteína bruta exerce papel central no valor nutricional das forragens, apresentando correlação positiva com o consumo de matéria seca (Oliveira et al., 2017). Esse efeito está parcialmente associado ao aumento da oferta de proteína degradável no rúmen, que favorece a atividade microbiana e melhora a digestibilidade dos alimentos consumidos (Cardoso et al., 2014).

Os constituintes fibrosos também exercem influência direta sobre o consumo e a digestibilidade. A FDN é reconhecida como um dos principais fatores limitantes do CMSPV, uma vez que forragens com elevados teores dessa fração apresentam menor taxa de digestão e maior tempo de retenção ruminal, resultando no chamado efeito de enchimento (Mertens et al., 1996). Esse efeito físico promove sensação de saciedade nos animais, reduzindo a ingestão voluntária de matéria seca (Oliveira et al., 2017). Assim, quanto maior o teor de FDN da forragem, menor tende a ser o CMSPV, o que pode comprometer o desempenho animal (Detmann et al., 2014).

Mertens (1992) sugeriu um limite máximo de ingestão de FDN correspondente a 1,2% do peso vivo. Contudo, esse valor pode variar de acordo com o estado fisiológico dos animais, sendo que vacas leiteiras em lactação apresentam maiores exigências nutricionais e maior capacidade de consumo quando comparadas a bovinos em manutenção (Cardoso et al., 2014).

Dessa forma, o conhecimento do CMSPV específico de cada forragem é essencial para o correto balanceamento das dietas, evitando restrições de consumo associadas ao efeito de enchimento.

A fração FDN corresponde à parede celular, que envolve todas as células vegetais (Bossoni et al., 2025). Esta é composta por celulose, hemicelulose e lignina. A celulose é um homopolissacarídeo não ramificado formado pela polimerização de glicose e suas moléculas são sintetizadas paralelamente umas às outras, formando uma microfibrila (Bossoni et al., 2025). Além da celulose, as paredes celulares das plantas também apresentam tipos variáveis de hemiceluloses, também conhecidas como glucanos de ligação cruzada, uma vez que se ligam alternadamente a microfibrilas vizinhas, promovendo sua ligação cruzada (Bossoni et al., 2025).

Enquanto a celulose e a hemicelulose apresentam potencial de digestão ruminal, a lignina é considerada indigestível e, por ser formada por compostos fenólicos, exerce efeito tóxico sobre os microrganismos ruminais (Silva e Queiroz, 2009). Além disso, a lignina atua como uma barreira física, dificultando o acesso microbiano aos carboidratos estruturais da parede celular e reduzindo a digestibilidade da fibra. Com o avanço do estágio de maturação das plantas, ocorre aumento da proporção de constituintes da parede celular, especialmente da lignina, em decorrência do direcionamento do carbono fotossintético para a estrutura vegetal, o que resulta em redução do valor nutritivo da forragem (Battiston et al., 2020).

A digestibilidade da matéria seca representa a fração do alimento ingerido que é efetivamente digerida e metabolizada pelo animal, constituindo um dos principais indicadores do valor nutricional das forragens (De Macêdo Carvalho et al., 2021). Além de refletir o potencial de fornecimento de nutrientes, a DIGMS influencia diretamente o consumo voluntário, uma vez que maiores taxas de digestão da fibra reduzem o tempo de permanência do alimento no rúmen, atenuando o efeito de enchimento e estimulando o consumo (Cardoso et al., 2014; Oliveira et al., 2017).

Estima-se que o consumo máximo de matéria seca seja alcançado em dietas com digestibilidade entre 66% e 68% (Cardoso et al., 2014). No entanto, forrageiras tropicais raramente atingem valores de digestibilidade superiores a 60%, o que faz com que, nessas condições, o consumo seja predominantemente limitado pelo enchimento ruminal (Nascimento et al., 2009).

O valor relativo da forragem (VRF) é um índice amplamente utilizado para a classificação da qualidade de forragens, especialmente na comercialização de fenos nos Estados Unidos, e tem sido empregado também na caracterização de pastagens. Esse índice combina estimativas de ingestão e digestibilidade obtidas a partir dos teores de FDN e FDA, resultando

em um valor numérico único (Ward, 2008). Um VRF igual a 100 corresponde, como referência, ao feno de alfafa, permitindo comparações indiretas entre diferentes forragens. Contudo, o uso do VRF para forragens sob pastejo deve ser criterioso, uma vez que os parâmetros que o compõem variam dinamicamente com o crescimento e o estágio de desenvolvimento das plantas.

2.9 Adubação Nitrogenada em pastagens

O suprimento de água e nitrogênio são dois dos principais fatores limitantes da produção agrícola, nos quais, o nitrogênio é considerado um dos macronutrientes mais importantes para o crescimento da plantas (Berger et al., 2020) sendo fundamental para a fotossíntese e a produtividade primária nas plantas (Yan et al., 2026). Em pastagens, o nitrogênio é essencial para a produção de gramíneas forrageiras de alta qualidade (Ardenti et al., 2022; Mahmoud et al., 2022; Zhuang et al., 2022), sendo o nutriente que mais limita o potencial produtivo (Fu et al., 2020). Essa limitação decorre da essencialidade do nitrogênio na composição de proteínas, ácidos nucleicos e diversas enzimas (Yan et al., 2026). A deficiência de nitrogênio restringe severamente a fotossíntese, reduz o acúmulo de biomassa e resulta em perdas significativas de produtividade (Peinado-Torrubia et al., 2023).

Consequentemente, o teor de nitrogênio nas plantas pode ser utilizado para avaliar suas condições fisiológicas, processos bioquímicos e estágios de crescimento e desenvolvimento, além de influenciar indiretamente o rendimento e a qualidade das culturas (Hou et al., 2021). Uma compreensão abrangente da demanda de N das culturas em condições de campo permitiria o uso ideal de fertilizantes nitrogenados (Yan et al., 2026).

A fertilização de pastagens promove um reconhecido potencial de aumento na produção de diversas culturas, no entanto em alguns casos não é adotada de forma expressiva nas propriedades pecuárias principalmente pelo custo e falta de conhecimento acerca de dosagem que proporcione os melhores resultados. Por outro lado, também ocorre da utilização errônea da adubação nitrogenada onde o N é perdido por lixiviação ou nitrificação no ambiente (Silva et al., 2024). Essas perdas provocam impactos severos sobre o solo, o ar e as águas superficiais em escala local, além de ocasionarem alterações na biodiversidade dos ecossistemas e no clima em escala global (Eisa et al., 2025).

Assim, o uso de fertilizantes nitrogenados deve ser cuidadosamente planejado e otimizado para evitar os impactos ambientais negativos decorrentes do uso excessivo de

nitrogênio, como tem sido observado em regiões desenvolvidas do mundo (Smerald et al., 2023). Nesse contexto, estudos contemplando doses de adubação nitrogenada são promissores por permitirem estimar a dose que proporcionaria a máxima produção forrageira, otimizando a utilização dos fertilizantes nitrogenados.

2.10 Eficiência do uso do Nitrogênio

O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais essenciais para a produção de biomassa e para a formação do rendimento das culturas agrícolas, desempenhando papel central na determinação do potencial produtivo (Zhang et al., 2025). Evidências demonstram que o manejo adequado desse nutriente promove significativamente o crescimento vegetativo e reprodutivo das plantas. No trigo, por exemplo, a aplicação adequada de N favorece o aumento da altura do colmo principal, do perfilhamento e do desenvolvimento radicular, além de elevar a absorção de N pelos grãos, a eficiência de uso do nitrogênio (NUE), o peso de mil grãos (PMG) e o número de grãos por espiga, resultando, por fim, em maior produtividade por unidade de área (Han et al., 2024; Feng et al., 2025). Nesse contexto, a absorção de N pelas culturas, associada à intensidade fotossintética, à acumulação de matéria seca e à translocação de nutrientes, constitui um conjunto de processos determinantes para a formação do rendimento (Li et al., 2024; Sun et al., 2024).

Do ponto de vista fisiológico, o nitrogênio participa diretamente da síntese de clorofila, proteínas, enzimas e outros compostos fundamentais ao metabolismo vegetal. Um suprimento adequado de N aumenta o índice de área foliar e os valores de SPAD, intensificando a atividade fotossintética e promovendo maior acúmulo de matéria seca, o que se reflete em incrementos no rendimento das culturas (Yang et al., 2022; Yue et al., 2022). Assim, a eficiência com que o N absorvido é assimilado e redistribuído ao longo do ciclo da cultura depende da integração entre absorção radicular, metabolismo fotossintético e translocação de nutrientes, reforçando a importância de práticas de manejo que favoreçam esses processos fisiológicos (Li et al., 2024; Sun et al., 2024).

Apesar de sua relevância agrônômica, a eficiência de uso do nitrogênio nas culturas é frequentemente baixa, em grande parte devido ao descompasso entre a oferta de N no solo e a demanda das plantas. Mesmo com aplicações parceladas de ureia, fatores como elevado pH do solo e a instabilidade dos processos de nitrificação–desnitrificação comprometem a absorção do nutriente, resultando em perdas significativas por volatilização e lixiviação (Zhang et al.,

2025). Essas perdas contribuem para o aumento das emissões de óxido nitroso (N_2O), um gás com potencial de aquecimento global cerca de 298 vezes superior ao do dióxido de carbono. De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), os solos agrícolas são responsáveis por mais de 60 % das emissões globais antropogênicas de N_2O , sendo os sistemas de cultivo de cereais uma das principais fontes (Zhang et al., 2025). O uso desordenado de N não apenas reduz a eficiência de uso do nutriente, como também intensifica impactos ambientais, incluindo a eutrofização de águas superficiais, a contaminação de águas subterrâneas e a acidificação do solo (Zhang et al., 2018), evidenciando a necessidade de estratégias mais eficientes e sustentáveis de manejo do nitrogênio.

Nesse contexto, a eficiência do uso do nitrogênio (EUN ou NUE, do inglês *Nitrogen Use Efficiency*), geralmente definida como a razão entre a acumulação de N pelas plantas e a quantidade de N fornecida ao sistema, tem sido amplamente utilizada como um importante indicador agrônomo da eficiência dos fertilizantes nitrogenados (Wen et al., 2026; Bastidas et al., 2024). Valores elevados ou reduzidos de NUE possuem implicações diretas sobre a produtividade das culturas, os custos de produção e os níveis de poluição ambiental (Bastidas et al., 2024). Embora a NUE em terras agrícolas globais tenha apresentado avanços nas últimas décadas, ela ainda permanece relativamente baixa, com estimativas recentes em torno de 46 % (40–53 %) (Zhang et al., 2021).

Práticas de manejo inadequadas, como a aplicação superficial de N em cobertura, podem reduzir a absorção do nutriente e a eficiência de uso do fertilizante devido à competição com plantas daninhas, a ocorrência de condições climáticas adversas, como chuvas intensas e ventos fortes, e a adsorção de N pela superfície do solo (Ren et al., 2026). Por outro lado, em regiões com precipitações intensas e concentradas, essa prática pode ser recomendada como estratégia para reduzir a lixiviação de nitrato para camadas mais profundas do solo, favorecendo a absorção de N pelas culturas e o aumento da NUE (Ren et al., 2026). Dessa forma, a avaliação da resposta de parâmetros fisiológicos e produtivos à aplicação de diferentes fontes e doses de fertilizantes nitrogenados torna-se essencial para a otimização das estratégias de fertilização, especialmente em gramíneas forrageiras e sistemas intensivos de produção (Bastidas et al., 2024).

Adicionalmente, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) têm emergido como uma estratégia promissora para o aumento da eficiência de uso do nitrogênio. O cultivo de pastagens de inverno nesses sistemas contribui para a melhoria da disponibilidade de N no solo e reduz a necessidade de fertilização nitrogenada mineral nas culturas subsequentes (Carlos et al., 2020; Denardin et al., 2020). Segundo Denardin et al. (2020), o

aumento da NUE em sistemas integrados está associado ao suprimento de N a partir de múltiplas fontes, promovendo melhor sincronização entre a absorção de N pelas culturas e a liberação do nutriente proveniente da matéria orgânica do solo e da atividade microbiana, o que contribui para sistemas de produção mais eficientes e ambientalmente sustentáveis.

4. CAPÍTULO 1

Insights no uso sustentável do nitrogênio na aveia branca em SIPAs com soja e arroz no Bioma Pampa

Sustainable nitrogen use in white oat within Crop–Livestock Systems with Soybean and Rice in the Pampa Biome

Lueli Fernandes Bragança¹, Luiza Vandrielli Goulart Unamuzaga¹, Mariana Trindade Barreto², Cleiton José Ramão³, Rodrigo Holz Krolow¹, Henrique da Costa Mendes Muniz¹, Deise Dalazen Castagnara^{1*}

¹Medicina Veterinária, Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil.
*deisecastagnara@unipampa.edu.br

²Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, Paraná, Brasil

³Instituto Riograndense do Arroz, Rio Grande do Sul, Brasil

[Agronomy for Sustainable Development – JCR 6,7](#)

Resumo

Objetivou-se estudar a produção e qualidade da forragem de aveia branca (*Avena sativa*) e uso de nitrogênio (N) mineral na implantação de um sistema integrado de produção agropecuária (SIPA), em plantio direto, com rotação com arroz e soja em cultivo de sequeiro e irrigação por aspersão no verão, sem irrigação no inverno. Dois ensaios experimentais sob blocos casualizados com parcelas subdivididas e quatro repetições foram conduzidos em 2020 e 2021. Alocou-se a cultura antecessora (soja ou arroz) na parcela e as doses de N (0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹) nas subparcelas. Estudou-se a produtividade de matéria seca (PMS) e a taxa de acúmulo de forragem (TAF), seu valor nutricional, bem como a concentração de a extração de N na MS da forragem, além da eficiência de uso (EUN), eficiência agrônômica (EAN) e a eficiência biológica (EBN) do N. No primeiro ano de introdução do SIPA, a PMS e a TAF foram superiores após a soja, em todas as doses de N, com aumento linear. Entretanto, no segundo ano (2021), permaneceram apenas as diferenças entre as doses, também com aumento linear. A cultura antecessora – soja ou arroz – não interfere no valor nutricional da forragem, é reduzido pelo aumento das doses de N. A concentração e extração de N foram superiores após a soja, e com resposta linear positiva para as doses. As EUN foram próximas ou superiores a 50%, enquanto todos os valores de EAN foram superiores a 20% e as EBN mantiveram-se próximas ou acima de 40% em toda as avaliações realizadas. O SIPA estudado permite elevada produção forrageira com expressivo aproveitamento do N mineral aplicado.

Palavras-chave: agricultura regenerativa, *Avena sativa*, bromatologia, cultura de serviço, eficiência de uso do nitrogênio, produção de forragem

Abstract

The objective of this study was to evaluate the production and quality of white oat (*Avena sativa*) forage and the use of mineral nitrogen (N) in the establishment of an integrated crop–livestock production system (ICLPS), under no-tillage, with rotation with rice and soybean under rainfed conditions and sprinkler irrigation in summer, without irrigation in winter. Two experimental trials in a randomized block design with split plots and four replications were conducted in 2020 and 2021. The preceding crop (soybean or rice) was allocated to the plots and N rates (0, 50, 100, and 150 kg ha⁻¹) to the subplots. Dry matter yield (DMY) and forage accumulation rate (FAR), forage nutritional value, as well as N concentration and extraction in forage dry matter were evaluated, in addition to nitrogen use efficiency (NUE), agronomic efficiency (AE), and biological efficiency (BE) of N. In the first year of ICLPS introduction, DMY and FAR were higher following soybean at all N rates, with a linear increase. However, in the second year (2021), only differences among N rates remained, also with a linear increase. The preceding crop—soybean or rice—did not affect forage nutritional value, which was reduced with increasing N rates. N concentration and extraction were higher following soybean, with a positive linear response to N rates. NUE values were close to or greater than 50%, while all AE values were greater than 20%, and BE values remained close to or above 40% in all evaluations. The studied ICLPS allows high forage production with expressive utilization of the applied mineral N.

Keywords: *Avena sativa*, bromatology, forage production, nitrogen use efficiency, regenerative agriculture, service crop

1 Introdução

Se não houverem ajustes nos modelos atuais de produção agropecuária, cerca de 600 milhões de pessoas deverão enfrentar o desafio da subnutrição crônica até 2030 (FAO et al., 2024). Paralelamente, áreas naturais estão sob processo de degradação devido à exploração econômica, como os campos do Bioma Pampa transformados em lavouras de arroz (Campoli e Stivali, 2026).

As lavouras de arroz tradicionais do sul do Brasil são conduzidas em monocultura com preparo anual do solo (Denardin et al., 2025) e irrigação por inundação nas áreas denominadas de terras baixas (Goulart et al., 2020). Embora representem uma importante fronteira agrícola no Brasil e no mundo (Goulart et al., 2020), a atividade agrícola nas terras baixas, além de substituir a vegetação natural e reduzir a biodiversidade (Campoli e Stivali, 2026), tem sofrido

com a redução dos índices produtivos do arroz mesmo sob maior aporte insustentável de insumos externos (Goulart et al., 2020).

Esse cenário exige estratégias capazes de aumentar a produção de alimentos ao mesmo tempo que preservem a integridade ambiental, compondo o conceito de agricultura regenerativa (Tittonell et al., 2022). Atendendo a estes princípios, os Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) (Mori et al., 2025) aumentam a produção primária de alimentos por melhorar a eficiência no uso dos recursos como nutrientes e água (Carvalho et al., 2024). Ainda, permitem a produção de alimentos de origem animal resultantes da inclusão de ruminantes em áreas agrícolas e contribuem na segurança alimentar (Adesogan et al., 2020).

Essa intensificação agroecológica da agricultura (Tittonell et al., 2022) obtida por meio da adoção de SIPAs tem diversas vantagens em termos de sustentabilidade (Meunier et al., 2025) devido a introdução de novas culturas e do componente animal ao sistema e por meio da otimização do uso dos recursos externos adicionados. A introdução da soja em rotação com gramíneas nos SIPAs atende a função de cultura de serviço (Gardarin et al., 2022), e em áreas de lavoura de arroz eliminam o revolvimento do solo, viabilizando o sistema de semeadura direta. As pastagens, além de suprirem a alimentação animal são importantes sumidouros de carbono (Delandmeter et al., 2024) e melhoradoras da estrutura do solo.

Porém, um nível superior de intensificação sustentável pode ser obtido por meio do manejo racional do nitrogênio (N) adicionado ao sistema, pois SIPAs consistem de uma estratégia promissora para aumentar a eficiência no uso do N (EUN) em lavouras de arroz (Denardin et al., 2025). As pastagens de inverno associadas a lavouras de soja melhoram a disponibilidade de N no solo (Carlos et al., 2020; Denardin et al., 2020) e reduzem a necessidade de adubação nitrogenada mineral nas safras subsequentes de arroz (Denardin et al., 2025).

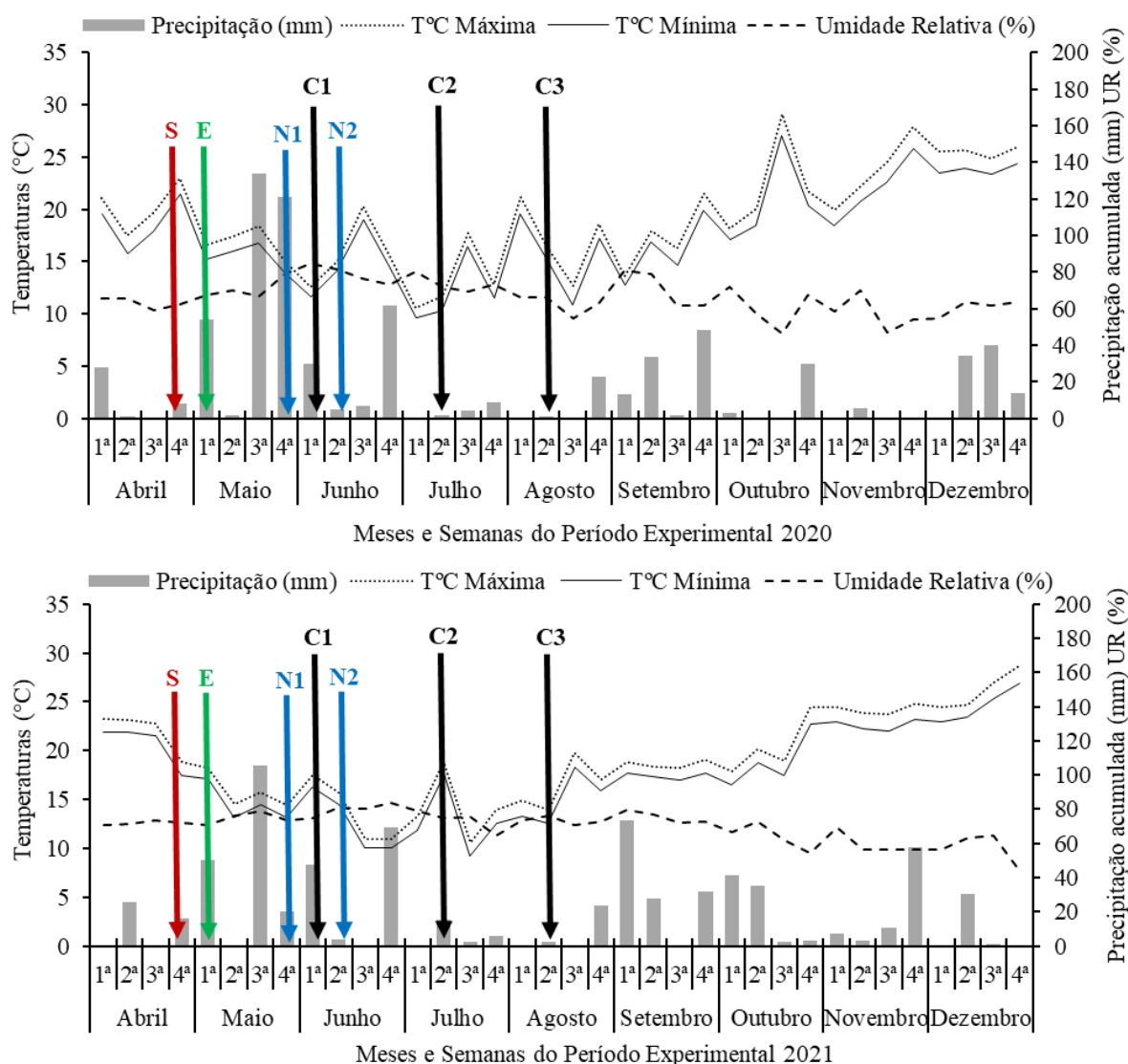
Até onde sabemos, nenhum estudo publicado mensurou o desempenho de pastagens de inverno em rotação com lavoura de arroz ou soja em sistema de plantio direto e irrigação por pivô central em terras baixas. Tampouco a eficiência da utilização de doses de nitrogênio nestas condições.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito de diferentes doses de adubação nitrogenada sobre a produção, qualidade nutricional da biomassa vegetal e parâmetros de eficiência de uso do fertilizante nitrogenado em pastagens de aveia branca (*Avena sativa*), cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, adotando-se o plantio direto como sistema de semeadura, e a aspersão em pivô central como modelo de irrigação nas culturas de verão.

2 Material e métodos

2.1 Local do estudo e desenho experimental

O experimento bianual foi estabelecido em 2020 e 2021 (abril à setembro) na Estação Experimental Agronômica, do Instituto Riograndense do Arroz (latitude 29°45'33"N, longitude 57°05'37"E, a uma altitude de 74 m acima do nível médio do mar), localizada no município de Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, ecossistema Bioma Pampa, sul do Brasil. O clima é classificado como Cfa 2, conforme classificação de Köppen, e os dados climatológicos foram monitorados (Fig. 1).



PPT: precipitação; T°C Max: temperatura máxima; T°C Min: temperatura mínima; UR: umidade relativa do ar; S: semeadura; E: emergência; N1: primeira aplicação de ureia; N2: segunda aplicação de ureia; C1, C2 e C3: primeiro, segundo e terceiro cortes da forragem, respectivamente. Fonte: elaborado pelos autores.

Fig. 1 - Dados climáticos semanais durante o período experimental, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de Aveia Branca em sucessão ao arroz ou soja, sob doses de nitrogênio, em Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

Durante os meses experimentais, a temperatura máxima média semanal variou entre 10,5 e 29,1°C (2020) e 10,6 e 23,2°C (2021), enquanto a temperatura mínima média semanal variou entre 9,6 e 21,4°C (2020) e 9,2 e 21,8°C (2021) e a precipitação total em cada período foi de 587 mm (2020) e 523 mm (2021).

O solo é classificado como Chernossolo Ebânico (Santos et al., 2025) (23% areia, 50% silte e 27% argila). Na camada de 0–20 cm apresentava: P (Mehlich extractor) 1,4 mg dm⁻³; MO 2%; pH (H₂O) 5,7 mol L⁻¹; H + Al = 4,15 cmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 cmol_c dm⁻³; K = 0,23 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 15,12 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 24,9 cmol_c dm⁻³; CTC = 21,4 cmol_c dm⁻³; Al = 0%; K = 0,37%; Mg/K = 74,6; Ca/Mg = 2,45; Ca/K = 185.

O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com parcelas subdivididas, com quatro repetições. O fator da parcela principal consistiu na cultura antecessora (Soja ou Arroz) manejados sob sistema de plantio direto com irrigação por pivô central e colhidos 30 dias antes da semeadura da aveia branca. O fator da subparcela incluiu as doses de N (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹), totalizando 32 parcelas. Cada parcela apresentava dimensões de 10,0 m × 4m.

Nas semeaduras realizadas em 23 de abril (2020) e 30 de abril (2021) com semeadora tratorizada de fluxo contínuo, foram distribuídos em linhas espaçadas de 0,17 m, 200 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 05-30-15 (N: P₂O₅: K₂O), e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (00-00-60), e 80 kg ha⁻¹ de sementes de aveia branca. A emergência das plântulas ocorreu aos 12 dias após a semeadura. A aplicação da primeira dose de N em cobertura (ureia – 46% N) foi realizada aos 25 dias após a emergência das plântulas, quando a cultura se encontrava no estágio vegetativo do terceiro trifólio (V₃) e a segunda dose foi logo após o primeiro corte.

2.2 Amostragens e análises laboratoriais

Na determinação da quantidade de palhada residual das lavouras de arroz e soja procedeu-se a amostragem em triplicata em área amostral de 0,25 m² em cada unidade experimental. Nesta, os resíduos culturais de arroz e soja foram coletados e submetidos à secagem em estufa com circulação forçada de ar (55 °C por 72 h), obtendo-se a massa seca por hectare de palhada residual. Para obtenção dos teores nitrogênio (N) e carbono (C) totais, as amostras foram trituradas em moinho tipo Willey, equipado com facas e câmara de aço inoxidável, utilizando peneira de 1 mm, e submetidas às análises laboratoriais. O C total foi determinado segundo o método descrito por Goldin (1987), com incineração das amostras em mufla para obtenção do teor de matéria orgânica, sendo os valores posteriormente divididos pelo fator 2,00, conforme proposto por Pribyl (2010), que considera que a matéria orgânica

contém 50% de C orgânico total. O N foi determinado por digestão sulfúrica seguida de destilação, conforme o método semi-micro Kjeldahl conforme AOAC (1995).

Na pastagem, foram realizadas três amostragens, iniciadas quando a forragem atingiu a altura recomendada para o pastejo, de 25 cm (Quatrin et al., 2017). No ano de 2020, as amostragens ocorreram aos 60, 102 e 138 dias após a semeadura, enquanto em 2021 foram realizadas aos 65, 100 e 135 dias após a semeadura. Após cada amostragem, a forragem remanescente em cada parcela experimental foi cortada e removida, simulando a realização de pastejos.

A produtividade de matéria seca de forragem (PMS), a taxa de acúmulo de forragem (TAF) e o seu valor nutricional foram estimados por meio de amostragens realizadas em triplicata em cada unidade experimental. A forragem foi coletada em uma área amostral de 0,75 m², com resíduos pós coleta de 10 cm em relação ao nível do solo, e submetida à secagem em estufa com circulação forçada de ar a 55 °C. A massa seca obtida foi posteriormente corrigida para kg ha⁻¹. A relação entre as produções e o intervalo de crescimento forrageiro foi usada para determinação da TAF, expressa em kg de MS de forragem ao dia.

As amostras secas foram trituradas em moinho tipo Willey, com facas e câmara de aço inoxidável, utilizando peneira de 1 mm, para determinação do valor nutricional da forragem. Foram estimados os teores de proteína bruta (PB), conforme AOAC (1995), fibra em detergente neutro (FDN), segundo Van Soest et al. (1991), e fibra em detergente ácido (FDA), conforme Van Soest (1994). A porcentagem de nutrientes digestíveis totais (NDT) da forragem foi estimada pela equação $NDT (g\ kg^{-1}) = 878,4 - (0,70 \times FDA)$, proposta por Bolsen (1996). O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV) foi estimado pela equação $CMSPV = 1200 / FDN$, conforme Mertens (1994). A digestibilidade da matéria seca (DMS) foi estimada pela equação $DMS (g\ kg^{-1}) = 889 - (0,779 \times FDA)$, conforme Bolsen (1996). O valor relativo da forragem (VRF) foi calculado pelo estimador $VRF = (DMS \times CMSPV) / 1,29$, de acordo com Bolsen (1996).

2.3 Estimativas dos parâmetros relativos ao nitrogênio

A determinação da concentração de nitrogênio no tecido vegetal (%) foi estimada conforme metodologia descrita pela AOAC (1995). A absorção total de N pela forragem foi estimada como o produto entre a produção de matéria seca da pastagem (PMS, em kg de MS ha⁻¹) e a concentração de N (%) no tecido vegetal (Baptistella et al., 2020).

A eficiência de uso do N (EUN) foi estimada como a fração aparente de recuperação do N, de acordo com Bastidas et al. (2024). Esse índice foi calculado pela diferença entre a

quantidade de N absorvida no tratamento fertilizado (NT_{CN} , em $kg\ ha^{-1}$) e aquela absorvida no tratamento sem fertilização (NT_{SN} , em $kg\ ha^{-1}$), dividida pela dose de nitrogênio aplicada no tratamento fertilizado (DN , em $kg\ ha^{-1}$), multiplicado por 100. Os resultados foram expressos em porcentagem do N aplicado.

A eficiência agrônômica do N (EAN) foi definida como a produção adicional de matéria seca obtida por unidade de N aplicado, sendo expressa em kg de matéria seca por kg de N aplicado. Esse índice foi calculado pela diferença entre a produção de matéria seca da forragem no tratamento fertilizado (MS_{CN} , em $kg\ ha^{-1}$) e no tratamento sem fertilização (MS_{SN} , em $kg\ ha^{-1}$), dividida pela dose de N aplicada (Fageria, 1998).

A eficiência Biológica do N (EBN), foi definida como a produção biológica obtida por unidade de N acumulado na planta, sendo expressa em kg de matéria seca por kg de N acumulado. Esse parâmetro foi calculado pela diferença entre a produção de matéria seca nos tratamentos com e sem fertilização nitrogenada, dividida pela diferença entre a absorção de N nos respectivos tratamentos, conforme descrito por Fageria (1998).

2.4 Análises estatísticas

Aos dados obtidos aplicou-se análise de variância (ANAVA) e foi adotado o teste F de Fisher (5%). Em caso de significância, aplicou-se o teste F de Fisher (5%) às palhadas residuais e análise de regressão linear e polinomial de segunda ordem às doses de N. Na escolha das equações, considerou-se a que melhor explicasse o comportamento dos dados bem como a significância dos coeficientes (Teste T de Student ao nível de 5%) e o coeficiente de determinação (R^2).

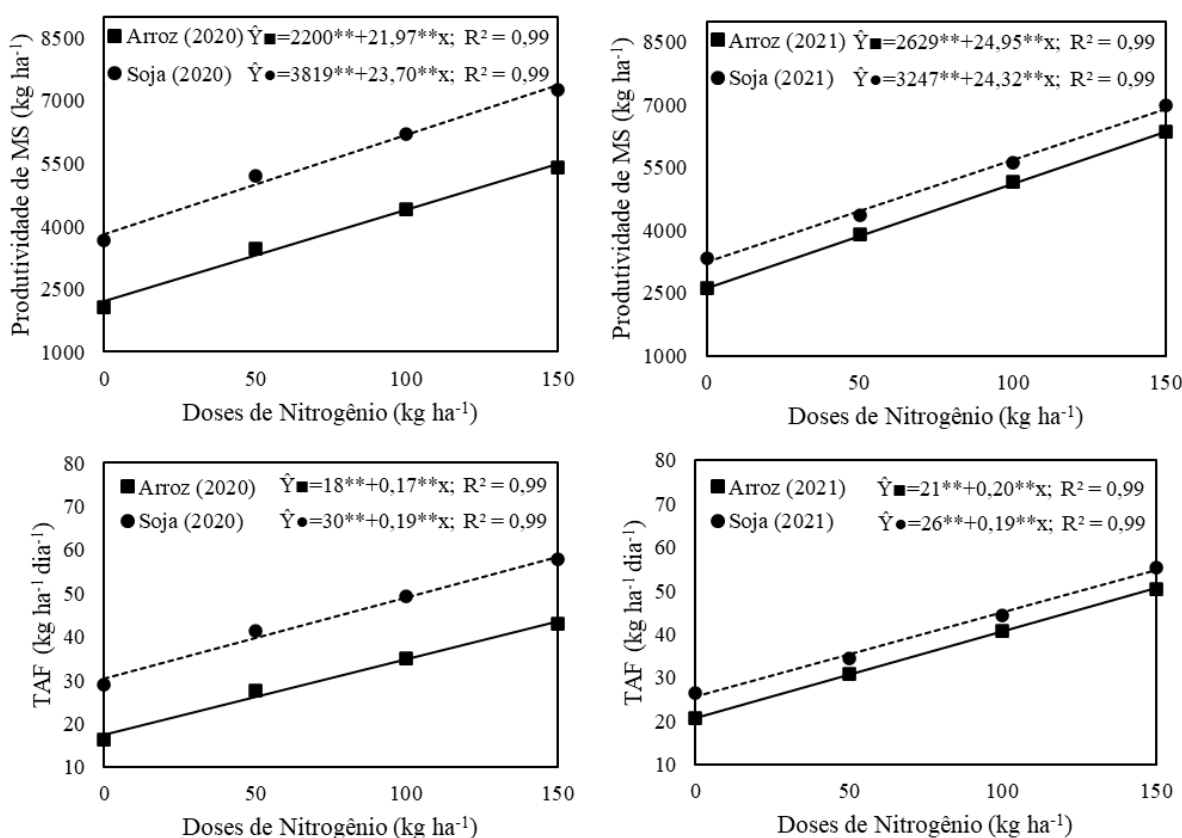
3 Resultados

Nos dois anos de avaliações, a deposição de palhada da lavoura de arroz foi superior à lavoura de soja ($p=0,000$). Em 2020 e 2021 a palhada depositada pelo arroz foi de 1898 e 1781 $kg\ ha^{-1}$, enquanto a lavoura de soja aportou 1579 e 1516 $kg\ N\ ha^{-1}$ de resíduos culturais em 2020 e 2021, respectivamente. Quanto ao nitrogênio contido nos resíduos culturais, o arroz, cuja concentração de N na palhada foi de 0,58%, aportou 11 e 10 $kg\ de\ N\ ha^{-1}$ nos anos de 2020 e 2021, respectivamente. A cultura da soja, mesmo com menor produção de resíduos culturais, devido ao maior teor de N na matéria seca (0,88%) aportou quantidades maiores de N (14 e 13 $kg\ ha^{-1}$ em 2020 e 2021, respectivamente).

Na produtividade de matéria seca (PMS) e taxa de acúmulo de forragem (TAF), houve ajuste linear positivo em resposta às doses de N (Fig. 2). Em 2020, cada $kg\ de\ N$ aplicado na

aveia branca após o arroz permitiu aumento na PMS de 21,97 kg ha⁻¹, e após a soja, 23,70 kg ha⁻¹. No segundo ano experimental (2021), os incrementos na PMS foram de 24,95 e 24,32 kg ha⁻¹ para cada kg de N aplicado na aveia branca após o arroz ou soja, respectivamente (Fig. 2).

A taxa de acúmulo de forragem (TAF) também se ajustou ao modelo linear positivo de regressão em 2020 e 2021, na aveia branca crescendo após o arroz e a soja (Fig. 2). Em 2020 e 2021, cada kg de N aplicado elevou a TAF em 0,17 e 0,20 kg ha⁻¹ dia⁻¹ quando a aveia branca foi semeada após a lavoura de arroz. Na aveia semeada após a soja, nos dois anos de estudo, cada kg de N aplicado elevou a TAF em 0,19 kg ha⁻¹ dia⁻¹.



**Significativo pelo teste T de Student (1%). Fonte: elaborado pelos autores.

Fig. 2 - Produtividade de matéria seca (PMS: kg ha⁻¹) e taxa de acúmulo de forragem (TAF: kg ha⁻¹ dia⁻¹) em pastagens de Aveia Branca cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

Em se tratando do valor nutricional, devido à similaridade dos resultados, estão apresentadas as médias dos anos de 2020 e 2021. Também, como não houve significância das palhadas residuais os resultados compilam suas médias. Entretanto, houveram diferenças significativas ($p < 0,000$) nos efeitos dos cortes e das doses, onde todos os parâmetros mensurados se ajustaram ao modelo linear de regressão, com resposta positiva ou negativa (Tab. 1).

Na proteína bruta, a resposta foi linear positiva em resposta às doses de N e observou-se redução nos teores no decorrer dos cortes devido ao avanço no ciclo forrageiro da cultura. Foram observados aumentos de 0,20; 0,13 e 0,14 g kg⁻¹ de proteína bruta para cada kg de N aplicado no primeiro, segundo e terceiro cortes. Esse aumento deve-se à maior disponibilidade de N para o metabolismo da planta proporcionado pelo uso das adubações.

Tab. 1 – Valor nutricional da forragem produzida por pastagens de Aveia Branca fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes (C1, C2 e C3), de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

Itens	Doses de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)				<i>p-Value</i>		Equação	EPM
	0	50	100	150	L	Q		
Proteína Bruta (g kg⁻¹)								
C1	114a	121a	133a	144a	0,000	0,228	Ŷ=112**+0,20**x; R²=0,99	1,47
C2	108b	112b	119b	127b	0,000	0,213	Ŷ=106**+0,13**x; R²=0,98	
C3	101c	105c	109c	123c	0,000	0,074	Ŷ= 98**+0,14**x; R²=0,89	
Fibra em Detergente Neutro (g kg⁻¹)								
C1	441c	461c	473c	480c	0,003	0,473	Ŷ=445**+0,25**x; R²=0,95	8,89
C2	579b	594b	604b	627b	0,000	0,649	Ŷ=578**+0,31**x; R²=0,97	
C3	612a	638a	651a	660a	0,000	0,337	Ŷ=617**+0,30**x; R²=0,93	
Fibra em Detergente Ácido (g kg⁻¹)								
C1	271c	286c	295c	302c	0,000	0,414	Ŷ=273**+0,21**x; R²=0,97	5,08
C2	350b	379b	448a	478a	0,000	0,892	Ŷ=346**+0,90**x; R²=0,97	
C3	377a	405a	413b	428b	0,000	0,220	Ŷ=381**+0,33**x; R²=0,95	
Consumo de Matéria Seca em percentual do Peso Vivo (%)								
C1	2,74a	2,56a	2,57a	2,52a	0,000	0,197	Ŷ=2,72**-0,0014**x; R²=0,94	0,03
C2	2,07b	1,98b	2,04b	1,92b	0,001	0,783	Ŷ=2,08**-0,0010**x; R²=0,98	
C3	1,96c	1,85c	1,83c	1,83b	0,003	0,075	Ŷ=1,95**-0,0009**x; R²=0,91	
Nutrientes Digestíveis Totais (g kg⁻¹)								
C1	689a	678a	672a	667a	0,000	0,414	Ŷ=687**-0,14**x; R²=0,97	3,56
C2	633b	612b	564c	543c	0,000	0,892	Ŷ=636**-0,63**x; R²=0,97	
C3	614b	595c	589b	578b	0,000	0,220	Ŷ=611**-0,23**x; R²=0,95	
Digestibilidade da Matéria Seca (g kg⁻¹)								
C1	677a	666a	659a	653a	0,000	0,414	Ŷ=676**-0,16**x; R²=0,97	3,96
C2	615b	593b	540c	516c	0,000	0,892	Ŷ=619**-0,70**x; R²=0,97	
C3	595c	574c	566b	555b	0,000	0,220	Ŷ=591**-0,25**x; R²=0,95	
Valor Relativo da Forragem (%)								
C1	145a	136a	131a	128a	0,000	0,066	Ŷ=143**-0,11**x; R²=0,94	1,54
C2	99b	93b	83b	77b	0,000	0,928	Ŷ= 99**-0,15**x; R²=0,99	
C3	91c	84c	81b	79b	0,000	0,163	Ŷ= 89**-0,08**x; R²=0,93	

**Significativo pelo teste T de Student (1%). *p-Value*: significância pelo teste F de Fisher na análise de variância dos modelos linear (L) e quadrático (Q). EPM: erro padrão da média. C1, C2 e C3: cortes realizados na pastagem ao longo do seu ciclo de crescimento forrageiro. Fonte: elaborado pelos autores.

Na avaliação da parede celular das plantas, mensurada por meio da fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) constatou-se aumento linear positivo em resposta às doses de N (Tab.1). A FDN é composta por lignina, celulose e hemicelulose, enquanto na FDA são encontradas a lignina e celulose. Estes compostos estão presentes na parede celular das células de vegetais, e sua concentração aumenta com a altura e com a idade das plantas. Assim, o aumento das doses de N estimulou maiores PMS, devido ao maior crescimento das plantas, que exigiu do metabolismo vegetal maior deposição dos componentes da parede celular para sustentação das estruturas das plantas, elevando assim o FDN e FDA.

No consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV), nutrientes digestíveis totais (NDT), digestibilidade da matéria seca (DGMS) e valor relativo da forragem (VRF) as doses de N promoveram efeito linear negativo (Tab.1). Todos estes parâmetros possuem relação inversa com os componentes da parede celular e traduzem o valor nutricional da forragem produzida.

O CMSPV é a quantidade de forragem que possível de ser consumida por ruminantes em relação ao seu peso vivo. A exigência de consumo de matéria seca (CMS) em ruminantes varia entre 2,00 e 4,50% do peso vivo (PV), considerando uma amplitude entre animais com menor exigência nutricional como bovinos de corte adultos e animais com maior exigência nutricional como vacas leiteiras de alta produção. As pastagens produzidas apresentaram valores inferiores a 2,50% (Tab.1), indicando que sua utilização como único componente de dietas seria possível apenas para animais de baixa a moderada exigência nutricional.

O NDT corresponde à concentração de nutrientes presentes na forragem possivelmente aproveitáveis pelos animais. Em todas as pastagens analisadas os valores de NDT estiveram próximos ou acima de 600 g kg^{-1} (Tab.1), indicando que a forragem produzida possui alto potencial para fornecimento de nutrientes destinados à produção de energia pelos animais.

Na DIGMS mensura-se qual a concentração de matéria seca potencialmente digestível no trato digestório de ruminantes. Ou seja, do total consumido pelos animais, quanto da forragem de fato poderia ser digerida com a liberação dos nutrientes para o aproveitamento animal. Em todas as forragens produzidas a DIGMS foi superior a 550 g kg^{-1} (Tab.1), valor considerado como limite inferior para caracterização de pastagens de adequada qualidade nutricional.

O VRF corresponde ao percentual de aproveitamento da forragem em relação ao feno de alfafa, considerado como uma forragem referência na nutrição de ruminantes. Os percentuais obtidos mantiveram superiores a 80% em todas as avaliações, e no primeiro corte superiores a

100% (Tab. 1). Ou seja, mesmo a aveia branca sendo uma gramínea, possui potencial para produção de forragem com alto valor relativo, superando até mesmo o feno de alfafa.

Na concentração de N na MS da forragem produzida, as respostas às doses de N foram lineares, com aumento de 0,0023% para cada kg de N aplicado em 2021 na aveia após arroz e soja. Em 2021 os incrementos foram superiores, com 0,0025 e 0,0032% na pastagem crescendo após lavoura de arroz e soja, respectivamente. Em 2020, as palhadas residuais não alteraram os teores de N na forragem, mas em 2021, a concentração de N foi superior na forragem produzida após a lavoura de soja em todas as doses de N aplicadas (Tab. 2).

Tab. 2 – Concentração de e extração de nitrogênio na forragem produzida por pastagens de Aveia Branca, cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

Dose de N (kg ha ⁻¹)									Equação	EPM
	Doses de N (kg ha ⁻¹)				p-Value					
	0	50	100	150	L	Q				
Concentração de N na MS da forragem (%)										
2020										
Arroz	1,76a	1,82a	1,95a	2,09a	0,000	0,571	Ŷ=1,73**+0,0023**x; R²=0,97	0,02		
Soja	1,76a	1,90a	2,03a	2,10a	0,000	0,375	Ŷ=1,77**+0,0023**x; R²=0,98			
2021										
Arroz	1,68b	1,78b	1,87b	2,06b	0,000	0,267	Ŷ=1,66**+0,0025**x; R²=0,97	0,02		
Soja	1,75a	1,89a	2,05a	2,23a	0,000	0,116	Ŷ=1,74**+0,0032**x; R²=0,99			
Extração de N na MS da forragem (kg ha ⁻¹)										
2020										
Arroz	36b	63b	86b	113b	0,000	0,845	Ŷ=37**+0,51**x; R²=0,99	1,38		
Soja	64a	99a	126a	152a	0,000	0,321	Ŷ=66**+0,58**x; R²=0,99			
2021										
Arroz	44b	69b	96b	131b	0,000	0,162	Ŷ=42**+0,58**x; R²=0,99	1,45		
Soja	58a	82a	115a	156a	0,000	0,116	Ŷ=54**+0,65**x; R²=0,99			

**Significativo pelo teste T de Student (1%). *p-Value*: significância pelo teste F de Fisher na análise de variância das dos modelos linear (L) e quadrático (Q). EPM: erro padrão da média. Fonte: elaborado pelos autores.

Na extração de N na matéria seca de forragem, observou-se aumento linear em resposta às doses (Tab. 2). Em 2020, as extrações de N foram mais expressivas na forragem cultivada após a soja. No entanto, em 2021 essas diferenças desapareceram, sugerindo um potencial de retenção do N na palhada do arroz com posterior liberação para a aveia branca.

Ainda, ao se considerar as extrações totais, observou-se que na forragem produzida após a soja em 2020 e nas produzidas após a soja e arroz em 2021 a forragem produzida extraiu valores superiores a 0,5 kg (Tab. 2). Ou seja, para cada kg de N aplicado, foi extraído 0,51 e

0,58 kg de N (Arroz e Soja em 2020, respectivamente) e 0,58 e 0,65 kg de N (Arroz e Soja em 2021, respectivamente). Estas extrações de N sugerem que as quantidades, composição nitrogenada e ambiente de cultivo favorecerem a liberação de N presentes na palhada e no solo, permitindo significativa absorção pelas plantas, resultando nos expressivos valores de extração.

Ainda, nas pastagens crescendo após a lavoura da soja, a aplicação de N de 100 kg ha⁻¹ viabilizou produção de MS que exportou 126 e 115 kg de N ha⁻¹, enquanto na dose de N de 150 kg ha⁻¹, as exportações de N na MS de forragem foram de 152 e 156 kg ha⁻¹, nos anos de 2020 e 2021, respectivamente. A dose de N de 50 kg ha⁻¹ viabilizou a exportação de 63 e 69 kg de N ha⁻¹ na forragem após o arroz e 99 e 85 kg de N ha⁻¹ na forragem após a soja, em 2020 e 2021, respectivamente.

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN-%) foi superior nas pastagens crescendo após a lavoura de soja em 2020 em todas as doses de N aplicadas, mas em 2021 essas diferenças não foram observadas (Tab. 3). As doses de N não impactaram na EUN da pastagem semeada após o arroz (2020 e 2021), porém, quando semeada após a soja, os resultados foram contraditórios, com redução da EUN com aumento das doses em 2020, e aumento da EUN com as doses em 2021. Essa inversão de respostas pode ter sido afetada pela dinâmica da MO no solo com a implantação dos SIPAs estudados, que permitiram maior aproveitamento do N na forragem após a soja em 2021, elevando a EUN em resposta ao aumento das doses de N (Tab. 3).

A eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN - kg de MS kg N aplicado⁻¹) foi maior na pastagem semeada após a lavoura de soja em 2020, e neste ano, o aumento das doses reduziu a EAN (Tab. 3). Porém, em 2021, a EAN foi maior na pastagem crescendo após o arroz nas doses de N 50 e 100 kg ha⁻¹, e, enquanto as doses de N não alteraram a EUN na pastagem crescendo após o arroz, quando semeada após a soja, o aumento das doses de N reduziu a EAN na pastagem (Tab. 3).

Na eficiência biológica do nitrogênio (EBN - kg de MS kg N acumulado⁻¹), em 2020 e 2021 os resultados foram semelhantes. A EBN foi superior nas pastagens crescendo sob as doses de N de 50 e 100 kg ha⁻¹ e após lavouras de arroz, enquanto o aumento das doses de N reduziu a EBN em todas as pastagens nos dois anos do estudo.

Tab. 3 – Eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Aveia Branca cultivadas em sucessão à lavouras de arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

Item	Antecessora	Doses de N (kg ha ⁻¹)		
		50	100	150
2020				
Eficiência de uso do nitrogênio (%)	Arroz	54bA	50bA	51bA
	Soja	69aA	62aB	59aB
<i>p-Value: 0,004</i>				
Eficiência Agrônômica do nitrogênio (kg de MS kg N aplicado ⁻¹)	Arroz	28bA	23aB	22aB
	Soja	31aA	26aB	24aB
<i>p-Value: 0,009</i>				
Eficiência Biológica do nitrogênio (kg de MS kg de N acumulado ⁻¹)	Arroz	52aA	47aB	43aC
	Soja	45bA	41bB	41aB
<i>p-Value: 0,023</i>				
2021				
Eficiência de uso do nitrogênio (%)	Arroz	51aA	53aA	58aA
	Soja	48aC	56aB	65aA
<i>p-Value: 0,002</i>				
Eficiência Agrônômica do nitrogênio (kg de MS kg N aplicado ⁻¹)	Arroz	26aA	25aA	25aA
	Soja	20bB	23bAB	24aA
<i>p-Value: 0,000</i>				
Eficiência Biológica do nitrogênio (kg de MS kg de N acumulado ⁻¹)	Arroz	51aA	48aA	43aB
	Soja	43bA	40bAB	37aB
<i>p-Value: 0,000</i>				

Médias seguidas de diferentes letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha diferem pelo teste Tukey (%). *P-Value*: significância pelo teste F de Fisher (5%) para a interação dos fatores estudados. Fonte: elaborado pelos autores.

4 Discussão

A adoção de sistemas integrados de produção agropecuária (SIPA) com a sucessão soja-aveia branca aumentou a produtividade de matéria seca (PMS) e a taxa de acúmulo de forragem (TAF) na pastagem, assim como a aplicação das doses de adubação nitrogenada em cobertura (Fig. 2). A maior PMS e TAF da aveia branca em sucessão à soja deve-se à melhor qualidade dos resíduos da soja, caracterizados por uma menor relação C/N e, consequentemente, maior aporte de N (Denardin et al., 2025). Essa condição reduz a imobilização temporária de N no solo, aumentando sua disponibilidade para a aveia branca. Também, a soja pode contribuir com maiores quantidades de N para culturas subsequentes (Denardin et al., 2025), pois os resíduos culturais depositados pela soja apresentaram maior concentração de N (88%) do que os depositados pelo arroz (58%). Esse ambiente proporciona condições mais favoráveis ao

desenvolvimento e à produtividade das culturas (Denardin et al., 2025) devido ao aumento da ciclagem de nutrientes (Farias et al., 2020).

A deposição de resíduos culturais na superfície do solo é uma das premissas básicas do plantio direto devido aos inúmeros benefícios proporcionados ao sistema produtivo como um todo (Siqueira et al., 2025). A cobertura vegetal reduz a temperatura do solo e a evaporação da água e aumenta a microporosidade na camada de 0–0,10 m do solo, o que aumenta o teor de água e a disponibilidade hídrica para a cultura subsequente (Santos et al., 2022).

Ainda, a ciclagem (Koudahe et al., 2022) e disponibilização de nutrientes também constituem benefícios relevantes. Além de carbono (C) e nitrogênio (N), a palha de arroz contém quantidades significativas de outros nutrientes, como fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S) que podem ser disponibilizados para as plantas por meio da mineralização que ocorre na decomposição dos resíduos (Santos et al., 2022).

Na soja, sua introdução em sistemas de rotação é considerada uma das estratégias mais úteis e sustentáveis para restaurar a fertilidade do solo e melhorar a produtividade das culturas (Zhang et al., 2019). Além dos benefícios obtidos a partir da menor relação C:N em comparação com a palhada de arroz, destaca-se o N derivado da rizosfera, e o N obtido por meio da mineralização da palhada de soja, que pode corresponder a mais de 50% do N inorgânico absorvido durante o crescimento das culturas (Geng et al., 2024).

Em se tratando das doses de N aplicadas, os aumentos na PMS e TAC devem-se ao maior aporte de N mineral no solo para absorção pela aveia branca (Fig. 2). Na fisiologia vegetal das plantas, o N participa diretamente da síntese de clorofila, proteínas, enzimas e outros compostos fundamentais ao metabolismo vegetal (Yang et al., 2022). Assim, o suprimento adequado de N intensifica a atividade fotossintética e promove maior acúmulo de matéria seca (MS), resultando em maior PMS de forragem (Yue et al., 2022).

O aumento da proteína bruta (PB) na forragem com as doses de N deve-se ao maior aporte do fertilizante nitrogenado no solo, que proporciona aumento nos teores de clorofila e níveis de N no tecido vegetal das plantas (Bonelli e Andrade, 2020). No entanto, as reduções da PB com o decorrer do ciclo de crescimento da forrageira devem-se ao aumento das taxas de crescimento e ao avanço do ciclo de crescimento forrageiro. Neste, as plantas, ao entrarem na fase reprodutiva, alongam os colmos para sustentação da inflorescência e cessam a emissão de folhas. Neste processo, depositam maiores quantidades de parede celular, o que reduz o conteúdo celular, reduzindo também os teores de PB. Ainda, o rápido crescimento devido à entrada na fase reprodutiva ocasiona o efeito de diluição da PB, reduzindo ainda mais seus teores na MS da forragem.

A fração FDN corresponde à parede celular, que envolve todas as células vegetais (Bossoni et al., 2025) e é composta por celulose, hemicelulose e lignina, enquanto a FDA é composta apenas por celulose e lignina. O aumento destes constituintes em função do aumento das doses de N (Tab. 1) deve-se às maiores taxas de crescimento, confirmadas pelas maiores TAF (Fig. 2). Em gramíneas forrageiras, maiores taxas de crescimento resultam em maior alongamento de colmos (Delevatti et al., 2019). Estes, para viabilizar a sustentação de plantas mais altas, depositam em sua parede celular maiores teores de celulose, hemicelulose e especialmente lignina, resultando em maiores teores de FDN e FDA. Comportamento semelhante destes parâmetros é observado com o avanço do ciclo de crescimento das forrageiras e sua entrada na fase reprodutiva (Zhang et al., 2022), justificando os maiores teores de FDN e FDA com o decorrer dos ciclos de crescimento avaliados. Neste processo as plantas priorizam o direcionamento do carbono fotossintético assimilado para a estrutura vegetal (colmos) em detrimento das folhas, resultando em uma forragem com maior conteúdo de parede celular e menor valor nutricional (Batistton et al., 2020).

O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV) possui relação inversa com o FDN devido ao efeito de enchimento ocasionado nos animais (Mertens et al., 1996) mantidos sob pastagens com elevados teores de parede celular. Esse efeito físico promove sensação de saciedade nos animais, reduzindo a ingestão voluntária de MS (Oliveira et al., 2017). Desta forma, observou-se nos resultados deste estudo redução nos valores de CMSPV em função das doses de N e dos ciclos de crescimento da forragem (Tab. 1). Entretanto, todas as pastagens produzidas com as doses de N e ciclos de crescimento da aveia branca apresentaram CMSPV próximos ou superiores a 2,0%. Estes resultados, associados aos teores de PB obtidos (Tab. 1) sugerem que as forragens produzidas podem ser utilizadas como única fonte alimentar em dietas de bovinos.

Nos nutrientes digestíveis totais (NDT) houve redução linear com o aumento das doses de N, bem como redução com os ciclos de crescimento da forrageira (Tab. 1). O NDT é um relevante índice nutricional de um alimento destinado à alimentação animal (Neumann et al., 2024) e reflete a proporção do alimento que poderia ser utilizada no metabolismo animal para o fornecimento de nutrientes. Apesar das reduções observadas neste estudo (Tab.1) em todas as avaliações os valores de NDT estiveram próximos ou superiores 550 g kg⁻¹ de MS, indicando elevado potencial de aproveitamento das forragens produzidas por ruminantes.

A digestibilidade da matéria seca (DIGMS) também é um parâmetro que interfere no consumo de matéria seca, e que portanto, possui relação com o desempenho animal, justificando sua avaliação em forrageiras. Neste estudo, a DIGMS decresceu linearmente com o aumento

das doses de N e foi superior no primeiro ciclo de crescimento da forragem (Tab. 1). Porém, em todas as avaliações os valores de DIGMS foram superiores a 515 g kg⁻¹ de MS, e no primeiro ciclo de crescimento da forragem foram próximos a 660 g kg⁻¹ de MS, considerados como ótimos para o máximo consumo de matéria seca (Cardoso et al., 2014).

A mensuração do VRF em forragens é relevante, pois constitui um indicador de qualidade em função da proporção de carboidratos estruturais e não estruturais. Valores próximos ou superiores a 100% refletem maior conteúdo de carboidratos não fibrosos, rapidamente fermentáveis no rúmen (Brandstetter et al., 2019), enquanto valores abaixo de 80% indicam predominância de carboidratos fibrosos, de digestão lenta, ou até indigestíveis, como a lignina (Gayer et al., 2019; Du et al. 2020). Desta forma, os elevados teores de VRF, superiores a 80% em todas as forragens avaliadas permitem sua caracterização como forragens de elevado valor nutricional e indicadas para altos desempenhos quando pastejadas por ruminantes.

Os resultados obtidos para a concentração de N na MS da forragem produzida pela aveia branca, com aumentos em resposta às doses de N ocorrem porque as plantas direcionam o carbono obtido com a fotossíntese para redução do N inorgânico e síntese de aminoácidos e proteínas (Zayed et al., 2023). Esse processo aumenta a concentração de N no tecido vegetal ao mesmo tempo que reduz a taxa de resposta ao aumento no acúmulo de matéria seca nas plantas (Fig. 2).

A maior concentração de N na MS da forragem semeada após a lavoura de soja em 2021 em todas as doses de N (Tab. 2) evidencia não somente os benefícios da cultura da soja, mas também, do SIPA implantado. Como foi adotado o sistema de alternância de culturas de verão nas áreas experimentais, área que recebeu semeadura do arroz em 2020 foi implantada com soja em 2021. A aveia semeada nesta área experimental e submetida à doses de N acumulou mais N na sua MS, mesmo na ausência da adubação nitrogenada devido à duas condições principais. A primeira refere-se ao aporte e características dos resíduos culturais da soja, que devido à menor relação C:N favorecem a mineralização do N e sua disponibilização para as plantas. E a segunda condição refere-se aos benefícios remanescentes da palhada de arroz cultivado na safra 2019/2020. Devido à menor relação C:N, a decomposição da palhada de arroz é mais lenta, mantendo-a por mais tempo na superfície do solo e também favorecendo sua incorporação no perfil do solo pela ação dos microrganismos. Esse ambiente minimiza a lixiviação do N devido à sua imobilização na palhada e liberação por meio de mineralização tardia. Nesse contexto, associa-se a possibilidade de as plantas de aveia terem absorvido também aminoácidos além do N inorgânico. Essa possibilidade ocorre em solos com adições orgânicas de resíduos culturais

ou esterco, pois diversos transportadores de aminoácidos já foram identificados em raízes de plantas (Zayed et al., 2023).

O N excedente da adubação nitrogenada mineral aplicada exportado na MS da forragem produzida após a soja nas doses de N de 100 e 150 kg ha⁻¹ e na dose de N de 50 kg ha⁻¹ na MS da forragem produzida após o arroz e a soja pode ter origem na palhada depositada e nas reservas de matéria orgânica do solo. Na soja são conhecidos a sua capacidade de produção de biomassa e de acúmulo de N na MS (Otto et al., 2024). Na aveia branca são conhecidos o potencial para aumento da atividade biológica do solo (Fontana et al., 2024) com a liberação gradual dos nutrientes acumulados nos resíduos culturais (Hahn et al., 2024) e consequente aumento da disponibilidade de N (Piva et al., 2021). Desta forma, o ambiente proporcionado pelo SIPA implantado em rotação com a soja favoreceu a maior disponibilização e aproveitamento do N mineral aplicado via fertilização. Os mesmos resultados não foram observados nas doses de N de 100 e 150 kg kg ha⁻¹ na pastagem crescendo após a lavoura de arroz devido à imobilização do N (Rosa et al., 2021) durante a decomposição da palhada de arroz ao longo do ciclo da cultura da aveia branca.

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN) que considera o N aplicado e acumulado na MS das plantas é um importante indicador agrônomo da eficiência dos fertilizantes nitrogenados (Wen et al., 2026; Bastidas et al., 2024). Neste estudo, a EUN na aveia branca foi próxima ou superior a 50% em todas as avaliações (Tab. 3), superando o valor de 30% citado com referência para EUN normalmente obtida em sistemas agrícolas (Kumar e Sindhu 2026). Resultados semelhantes aos observados em 2020, onde ocorreu redução da EUN com o aumento das doses de N também foram observados por Liu et al. (2025) ao estudarem doses de N e frequências de corte em aveia branca no noroeste da China.

O comportamento inverso de redução na EUN em 2020 e aumento da EUN em 2021 como resposta às doses de N aplicadas sinaliza benefícios dos SIPAs estudados no seu segundo ano de implantação. Destes, destacam-se o fornecimento de N para as culturas a partir de múltiplas fontes (palhada, adubação mineral e matéria orgânica do solo), maior atividade microbiana e melhor sincronização entre mineralização e absorção pelas plantas (Denardin et al., 2020).

A redução da eficiência agrônômica do N (EAN), que corresponde a produção adicional de MS obtida por unidade de N aplicado, na MS da aveia branca cultivada após o arroz e a soja em 2020 com o aumento das doses de N (Tab. 3) é explicada pela Lei dos Rendimentos Decrescentes (ou Lei de Mitscherlich). Nesta, Mitscherlich (1909) observou que, com o aumento das doses de fertilizantes, a produtividade das culturas aumenta, porém a taxas

decrecentes. Apesar deste processo poder ser explicado pela Lei de Mitscherlich, diversos são os fatores que afetam a disponibilidade de N no solo e seu aproveitamento pelas plantas. Destes, destacam-se o tipo de matéria orgânica, características do solo, atividade microbiana, condições ambientais, estágio fenológico de desenvolvimento da cultura (Weiler et al., 2022, Dias et al., 2025, Kumar e Sindhu, 2026).

A maior EAN na aveia branca semeada após a soja em 2020 e fertilizada com dose de N de 50 kg ha⁻¹ (Tab. 3 - 31 kg de MS kg de N aplicado⁻¹) pode ser explicada pela teoria estequiométrica, que explica a redução na relação C:N dos exsudatos radiculares com o aumento da disponibilidade de N no solo (Fan et al., 2022). Esse aumento de N visa atender às necessidades microbianas permitindo maior crescimento microbiano e acelerando a decomposição da matéria orgânica e a mineralização de N (Zhou et al., 2022). Nas demais doses não foi observado o mesmo efeito pois o N mineral aplicado via fertilização (100 e 150 kg de N ha⁻¹) não estimulou a alteração dos exsudatos radiculares da aveia.

A produção biológica obtida por unidade de N acumulado na planta, denominada de eficiência biológica do N (EBN) foi menor na forragem crescendo após a soja nas doses de N de 50 e 100 kg ha⁻¹ devido à maior concentração de N na MS (Tab. 2). Os valores de EBN foram superiores aos EAN, com todos os resultados próximos ou superiores a 40 kg de MS kg de N acumulado⁻¹, porém, em todas as avaliações observou-se redução da EBN com o aumento das doses (Tab. 3). Em condições de maior absorção de N, para fixação do mesmo na forma de aminoácidos e proteínas, a planta direciona o carbono fixado para a redução do N ao invés de utilizá-lo para o acúmulo de MS (Zayed et al., 2023).

5 Conclusões

No primeiro ano de introdução do SIPA com rotação culturas de verão (arroz ou soja) e aveia branca sob doses de N (0; 50; 100 e 150 kg ha⁻¹) no inverno, a produção forrageira é superior após a soja. Entretanto, no segundo ano permanecem as diferenças apenas entre as doses, com aumento linear de produção.

A cultura antecessora – soja ou arroz – não interfere no valor nutricional da forragem produzida pela aveia branca, que altera-se em resposta às doses de N. Doses crescentes de 0 a 150 kg de N ha⁻¹ aumentam os teores de PB, FDN e FDA, porém, reduzem os demais parâmetros nutricionais da forragem, como NDT e DIGMS.

No primeiro ano de SIPA com soja e arroz em sequeiro no verão e aveia branca sob doses de N no inverno, a utilização do N é mais eficiente na forragem produzida após a soja.

Porém, as diferenças desaparecem ou são menos expressivas no segundo ano após a implantação do SIPA.

6 Referências Bibliográficas

ADESOGAN, A.T.; HAVELAAR, A.H.; MCKUNE, S.L.; EILITTA, M.; DAHL, G.E.; Animal source foods: Sustainability problem or malnutrition and sustainability solution? Perspective matters, **Global Food Security**, v. 25, n. 6, 100325, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2019.100325>.

BAPTISTELLA, J.L.C.; ANDRADE, S.A.L.; FAVARIN, J.L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, n. 10, p.119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.

BASTIDAS, M.; VÁZQUEZ, E.; VILLEGAS, D.M.; RAO, I.M.; GUTIERREZ, J.F.; VIVAS-QUILA, N.J.; AMADO, M.; BERDUGO, C.; ARANGO, J. Optimizing nitrogen use efficiency of six forage grasses to reduce nitrogen loss from intensification of tropical pastures. Agriculture, **Ecosystems and Environment**, v. 367, n. 3, 108970, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108970>.

BOLSEN, K.K. **Silage technology**. In: AUSTRALIAN MAIZE CONFERENCE, 2., 1996, Queensland. [Proceedings] Queensland: Gatton College, 1996. p.1-30.

BONELLI, L.E., ANDRADE, F.H., Maize radiation use-efficiency response to optimally distributed foliar-nitrogen-content depends on canopy leaf-area index. **Field Crops Research**, v. 247, n. 2, 107557, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107557>.

BOSSONI, G.E.B.; ALMEIDA, A.M.; CONSTANTIN, R.P.; MARCIOSI, R.; FERRARESE-FILHO, O.; SAGE, R.F.; SANTOS, W.D. Assessing the cell wall nitrogen use efficiency – Can the differences between cell wall architectures contribute to the nitrogen economy of plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 229, n. 12, 110548, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110548>.

BRANDSTETTER, E. V.; PINHO COSTA, K.A.; SANTOS, D.C.; SOUZA, W.F.; COSTA E SILVA, V.; CASTRO DIAS, M.B. Protein and carbohydrate fractionation of Jiggs Bermudagrass in different seasons and under intermittent grazing by Holstein cows. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 41, n. 1, p. 1–7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.43363>.

CAMPOLI, J.S.; STIVALI, M. Social cost of deforestation in Brazilian biomes. **Journal for Nature Conservation**, v. 91, n. 1, 127189, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127189>.

CARDOSO E.S.; SANTANA JUNIOR, H.A.; SANTANA, E.O.C.; FERREIRA, A.H.C.; MACIEL, M.S.; OLIVEIRA, Z.F.; FIGUEIREDO, C.B.; BRITO, J.M. Reguladores de consumo de bovinos em pastagem: recentes avanços. **Revista eletrônica Nutritime**. v. 11, n. 5, p. 3672-3682. 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://nutriti.me.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Artigo-271.pdf

CARLOS, F.S.; DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; ROSSI, I.; BUCHAIN, M.P.; CEREZA, T.; CARMONA, F.C.; CAMARGO, F.A. Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 18, p. 2962–2972, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>.

CARVALHO, P.C. DE F.; DA SILVEIRA PONTES, L.; BARRO, R.S.; SIMÕES, V.J.L.P.; DOMINSCHKE, R.; DOS SANTOS CARGNELUTTI, C., MAURICIO, R.M.; SÃO JOSÉ, J.F.B.; BREMM, C. Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p.2309, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01057-9>.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul. UFRGS, 2016.

DELANDMETER, M; CARVALHO, P.C.F.; BREMM, C.; CARGNELUTTI, C.S.; BINDELLE, J.; DUMONT, B. Integrated crop and livestock systems increase both climate change adaptation and mitigation capacities. **Science of The Total Environment**, v. 912, n. 2, 169061, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169061>.

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A.S.; BARBERO, R.P.; LEITE, R.G.; ROMANZINI, E.P.; RUGGIERI, A.C.; REIS, R.A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>.

DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; CARMONA, F.C.; VELOSO, M.G.; CARMONA, G.I.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I. Integrated crop–livestock systems in paddy fields: New strategies for flooded rice nutrition. **Agronomy Journal**, v. 112, n.3, p.2219–2229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20148>.

DENARDIN, L.G.D.O.; ALVES, L.A.; MARTINS, A.P.; FLORES, J.P.M.; BRAWERS, L.P.; FILIPPI, D.; CAMARGO, F.A.D.O. Enhancing nitrogen use efficiency in paddy fields: the role of livestock integration and rice-soybean rotation. **Field Crops Research**, v. 333, n.1, 110059, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110059>.

DIAS, V.O.; RIBAS, G.G.; SOUZA, M.E.A.; SANTANA, D.M.; RAPHAEL, J.P.A.; KHATOUNIAN, C.A.; FAVARIN, J.L. Plant residue quality indices for selecting summer cover crops in tropical environments. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 49, n. 1, e014325, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202549014325>

DU, Z.; RISU, N.; GENTU, G.; JIA, Y.; CAI, Y. Dynamic changes and characterization of the protein and carbohydrate fractions of native grass grown in Inner Mongolia during ensiling and the aerobic stage. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 33, n. 4, p. 556–567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0212>.

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16>.

FAN, K.; HOLLAND-MORITZ, H.; WALSH, C.; GUO, X.; WANG, D.; BAI, Y.; ZHU, Y.-G.; FIERER, N.; CHU, H., Identification of the rhizosphere microbes that actively consume plant-derived carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 166, n.3, 108577, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108577>.

FAO; IFAD; UNICEF; WFP; WHO (2024) **The State of Food Security and Nutrition in the World**, 286p., Rome, Italy, Unicef, 2024: DOI: <https://doi.org/10.4060/cd1254en>.

FARIAS, G.D., DUBEUX, J.C.B., SAVIAN, J.V., DUARTE, L.P., MARTINS, A.P., TIECHER, T., ALVES, L.A., CARVALHO, P.C.F., BREMM, C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 6, p. 1–9. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>.

FONTANA, M.B.; NOVELLI, L.E.; STERREN, M.A.; UHRICH, W.G.; RONDAN, G.A.; BARBAGELATA, P.A.; BENITENDE, S. M. Cover crop benefit bacteria and increase aggregate-associate soil C and N storage. **Geoderma Regional**, v. 36, n. 3, e00743, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00743>.

GARDARIN, A.; CELETTE, F.; NAUDIN, C.; PIVA, G.; VALANTIN-MORISON, M. et al Intercropping with service crops provides multiple services in temperate arable systems: a review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n.3, p.39, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00771-x>.

GAYER, T. O. et al. Different dry matters content used for the conservation of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in anaerobic environment. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 6, p. 369–378, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13675>.

GENG, S.; LI, L.; MIAO, Y.; ZHANG, Y.; YU, X.; ZHANG, D.; YANG, Q.; ZHANG, X.; WANG, Y. Nitrogen rhizodeposition from corn and soybean, and its contribution to the subsequent wheat crops. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 7, p. 2446–2457, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.11.018>.

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, n. 10, p.1111-1116, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>.

GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, n. 1, 102715, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102715>.

HAHN, L.; WAMSER, A.F.; WOLSCHICK, N.H.; GRANDO, D.L.; SIQUEIRA, G.N.; BRUNETTO, G. Garlic yield after decomposition and nutrient release of cover crops under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 48, n.1, e0230134, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230124>

KOUDAHE, K.; ALLEN, S.C.; DJAMAN, K.; Critical review of the impact of cover crops on soil properties. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 343-354, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

KUMAR, S.; SINDHU, S.S. Microbiome-mediated nitrogen cycling in soil: Impact on nitrogen use efficiency, crop production and environmental sustainability, **Soil Security**, v. 22, n. 3, 100225, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2026.100225>.

LIU, W.; YAN, S.; JIANG, N.; LI, M.; YIN, L.; ZHANG, S.; XIE, X.; GAO, G.; CHANG, S.; HOU, F. Interaction of nitrogen and mowing frequency in enhancing regeneration and crude protein content of forage oat in Northwestern of China. **Field Crops Research**, v. 331, n. 10, 109994, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109994>

MERTENS, D. R. Formulating dairy rations: using fiber and carbohydrate analyses to formulate dairy rations. In: **Information conference with dairy and forage industries**. Madison: US Dairy Forage and Research Center, 1996.

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. In: **Forage Quality, Evaluation, and Utilization**, G. C. Fahey, Jr, M. Collins, D. R. Mertens, and L. E. Moser, ed., American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI, 1994. p. 450–493. DOI: <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c11>

MEUNIER, C.; RYSCHAWY, J.; MARTIN, G. Reintegrating livestock onto crop farms: A step towards agroenvironmental sustainability? **Agricultural Systems**, v. 227, n. 6, 104356, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104356>

MITSCHERLICH, E. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtsch Jahrb**, v. 38, n. 1, p. 537–552, 1909.

MORI, L.D.; SIMÕES, V.J.L.; CARGNELUTTI, C.S.; DUARTE, L.P.; LEAL, G.L.; DOBERSTEIN, A.P.; KUNRATH, T.R.; NUNES, P.A.A.; SOUZA, E.D.; BAYER, C.; CARVALHO, P.C.F. Grazing intensity for enhanced resource use efficiency in integrated crop-livestock systems: Balancing soil carbon storage and food security. **Journal of Environmental Management**, v. 373, n. 1, 123541, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123541>

NEUMANN, M.; BALDISSERA, E.; ALESSI IENKE, L.; MARTINS DE SOUZA, A.; PIEMONTEZ DE OLIVEIRA, P.E.; HARRY BUMBIERIS JUNIOR, V. Nutritional Value Evaluation of Corn Silage from Different Mesoregions of Southern Brazil. **Agriculture**, v. 14, n. 7, p.1055, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071055>.

OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS. Association of Official Analytical Chemistry, 12 ed. Washington, D.C. 1995.

OLIVEIRA, B. C., DE OLIVEIRA, G., CAETANO, M. B., RAIMUNDO, T., & DE OLIVEIRA, C. B. Mecanismos reguladores de consumo em bovinos de corte. **Nutritime revista eletrônica**, v.14, n.4, p. 6066-6075, 2017. Disponível em: <http://efaidnbnmnibpcajpcglclefindmkaj/https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-433.pdf>.

PIVA, J.T.; BRATTI, F.; LOCATELLI, J.L.; RIBEIRO, R.H.; BESEN, M.R.; BRANCALEONI, E.; SCHMITT, D.E.; Use of winter cover crops improves maize productivity under reduced nitrogen fertilization: a long-term study. **Bragantia**, v. 80, n.1, p. 1–11, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20200165>.

PRIBYL, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v.156, n.3-4, p.75-83, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>

QUATRIN, M. P.; OLIVO, C.J.; MEINERZ, G.R.; FONTANELLI, R.S.; AGUIRRE, P.F.; SEIBT, D.C.; AIRES, J.F.; FALK, D.R.; SAUTER, C.P.; SILVA, A.R. Produtividade de genótipos de trigo duplo propósito submetidos ao pastejo com vacas em lactação. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 69, n. 6, p. 1615-1623, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9470>

ROSA, A.T.; CREECH, C.F.; WLMORE, R.W.; RUDNICK, D.R.; LINDQUIST, J.L.; FUDOLIG, M.; BUTTS, L.; WERLE, R. Implications of cover crop planting and termination timing on rainfed maize production in semi-arid cropping systems. **Field Crops Research**, v. 217, n. 9, 108251, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108251>.

SANTOS, A.B.D.; SILVA, M.A.S.D.; STONE, L.F.; HEINEMANN, A.B. Management of rice straw in rice-soybean succession in tropical lowland. **Revista Ceres**, v. 69, n.4, 390–399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040002>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; LIMA, H.N.; MARQUES, F.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 396 p.

SIQUEIRA, G.N.; TIECHER, T.L.; ALVES, L.A.; TASSINARI, A.; GRANDO, D.L.; DRESCHER, G.L.; BRUNETTO, G.; GOULART, R.Z.; BORDIGNON, V.; TIECHER, T. Short-term effects of winter cover crops and summer cash crops on soil properties in Ultisol under no-tillage system in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 40, n. 3, e00935, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00935>

TITTONELL, P.; MUJTAR, V.E.; FELIX, J.; KEBEDE, Y.; LABORDA, L.; VENET, J. Regenerative agriculture—agroecology without politics? **Frontiers in sustainable food systems**, v. 6, n. 10, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.844261>

VAN SOEST, P. V. et al Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of dairy science**, v. 74, n. 10, p. 3583-3597, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**, 2nd ed. Ithaca: Cornell University press. United States of America, 476p, 1994.

WEILER, D.A.; AITA, C.; BASTOS, L.M.; GIACOMINI, S.J. Changes in chemical composition of cover crops residue during decomposition. **Ciência Rural**, v. 52, n. 4, e20210357, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210357>.

WEN, K.; PENG, A.; WEI, Y.; ZHANG, M.; WU, Z.; YOU, J.W.; XU, W.; LI, X.; CHEN, Y.; MA, Y.; WEI, L.; HUANG, W.; MI, B.; XIE, L.; LIAO, D.; ZHANG, W. Pumpkin rootstock enhances nitrogen-use efficiency and low-nitrogen resilience in *Benincasa hispida* via coordinated nitrogen transport and phenylpropanoid metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 230, n. 1, 110848, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110848>

YANG, L., MUHAMMAD, I., CHI, Y.X., LIU, Y.X., WANG, G.Y., WANG, Y., ZHOU, X.B., 2022. Straw return and nitrogen fertilization regulate soil greenhouse gas emissions and global warming potential in dual maize cropping system. **Science of The Total Environment**, v. 853, n. 12, 158370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158370>.

YUE, K., LI, L., XIE, J., WANG, L., LIU, Y., ANWAR, S., Tillage and nitrogen supply affects maize yield by regulating photosynthetic capacity, hormonal changes and grain filling in the Loess Plateau. **Soil Tillage Research**, v. 218, n. 4, 105317, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105317>.

ZAYED, O.; HEWEDY, O.A.; ABDELMOTELEB, A.; ALI, M.; YOUSSEF, M.S.; ROUMIA, A.F.; SEYMOUR, D.; YUAN, Z.-C. Nitrogen Journey in Plants: From Uptake to Metabolism, Stress Response, and Microbe Interaction. **Biomolecules**, v. 13, n. 10, p. 1443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom13101443>.

ZHANG, S.; LIU, Y.; DU, M.; SHOU, G.; WANG, Z.; XU, G. Nitrogen as a regulator for flowering time in plant. **Plant Soil**, v. 480, n.10, p. 1–29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05608-w>

ZHANG, S.; ZHENG, Q.; NOLL, L.; HU, Y.; WANEK, W. Environmental effects on soil microbial nitrogen use efficiency are controlled by allocation of organic nitrogen to microbial growth and regulate gross N mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, v.135, n. 10, p. 304-315, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.019>.

ZHOU, J.; GUILLAUME, T.; WEN, Y.; BLAGODATSKAYA, E.; SHAHBAZ, M.; ZENG, Z.; PEIXOTO, L.; ZANG, H.; KUZYAKOV, Y. Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**. 175, 108850. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108850>.

5. CAPÍTULO 2

Respostas biológicas do azevém sob doses de nitrogênio em SIPAs com soja e arroz no Bioma Pampa

Biological Performance of Nitrogen Use Efficiency by Black Oat After Soybean or Rice in Integrated Crop–Livestock Systems in the Pampa Biome

Lueli Fernandes Bragança¹, Luiza Vandrielli Goulart Unamuzaga¹, Mariana Trindade Barreto², Cleiton José Ramão³, Rodrigo Holz Krolow¹, Henrique da Costa Mendes Muniz¹, Deise Dalazen Castagnara^{1*}

¹Medicina Veterinária, Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil.

[*deisecastagnara@unipampa.edu.br](mailto:deisecastagnara@unipampa.edu.br)

²Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, Paraná, Brasil

³Instituto Riograndense do Arroz, Rio Grande do Sul, Brasil

[Environment, development and sustainability – JCR 4,2](#)

Resumo

Sistemas Integrados de Produção Agropecuária (SIPAs) contribuem com a sustentabilidade de sistemas produtivos, porém, dependem da produção forrageira e eficiência de uso dos recursos disponíveis. Assim, objetivou-se estudar sob condições de campo em 2020 e 2021 os efeitos das rotações arroz ou soja – azevém e cinco doses de nitrogênio (N) (0; 50; 100; 150 kg ha⁻¹) aplicados no azevém sobre seus parâmetros produtivos, nutricionais e de eficiência de uso do N. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados com parcelas subdivididas, com o arroz ou a soja nas parcelas e o N nas subparcelas, com quatro repetições. Mensurou-se os resíduos culturais da soja e arroz, a produção (PMS) e taxa de acúmulo (TAF) de matéria seca de forragem, valor nutricional, concentração e absorção de N, eficiência de uso (EUN), eficiência agrônômica (EAN) e eficiência biológica (EBN) do N em três ciclos de crescimento (C1, C2 e C3) do azevém anual. A soja produziu menos palhada, mas com menor relação C:N (65:1) do que o arroz (96:1). A PMS e TAF cresceram linearmente em resposta às doses de N, e foram maiores no azevém semeado após a soja. Os parâmetros nutricionais exceto a proteína bruta (PB) decresceram com o N aplicado e com os ciclos de crescimento da pastagem. A concentração e absorção de N foram maiores após a soja, enquanto a EUN foi 75% (2020) e 30% (2021) superior no azevém sem N após a soja. A EAN foi maior após o arroz com 28 (2020) e 29 (2021) kg de MS kg N aplicado⁻¹ no azevém. Maiores EBN (kg MS kg N absorvido⁻¹) foram obtidas com 50 kg de N ha⁻¹ no arroz (45-2020 e 2021) e soja (41-2020; 44-2021). Os SIPAs estudados caracterizam-se como ambientalmente sustentáveis, pois permitem produção elevada produção forrageira, com significativo valor nutricional e eficiência de uso N aplicado.

Palavras-chave: agricultura regenerativa, adubação nitrogenada, *Lolium multiflorum*, bromatologia, eficiência de uso do nitrogênio, produção de forragem

Abstract

Integrated Crop–Livestock Production Systems (ICLPS) contribute to the sustainability of production systems; however, they depend on forage production and the efficient use of available resources. Thus, under field conditions in 2020 and 2021, this study aimed to evaluate the effects of rice or soybean–ryegrass rotations and five nitrogen (N) rates (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹) applied to ryegrass on its productive, nutritional, and N-use efficiency parameters. A randomized block design with split plots and four replications was adopted, with rice or soybean allocated to the plots and N rates to the subplots. Crop residues from soybean and rice were quantified, as well as forage dry matter yield (DMY) and forage accumulation rate (FAR), nutritional value, N concentration and uptake, nitrogen use efficiency (NUE), agronomic efficiency (AE), and biological efficiency (BE) of N across three growth cycles (C1, C2, and C3) of annual ryegrass. Soybean produced less straw but with a less C:N ratio (65:1) than rice (96:1). DMY and FAR increased linearly in response to N rates and were higher in ryegrass sown after soybean. Nutritional parameters, except crude protein (CP), decreased with increasing N rates and advancing pasture growth cycles. N concentration and uptake were higher following soybean, whereas NUE was 75% (2020) and 30% (2021) higher in ryegrass without N application after soybean. Agronomic efficiency was higher following rice, with 28 (2020) and 29 (2021) kg of dry matter per kg of N applied in ryegrass. The highest biological efficiency values (kg DM kg⁻¹ N absorbed) were obtained with 50 kg N ha⁻¹ after rice (45 in 2020 and 2021) and soybean (41 in 2020; 44 in 2021). The studied ICLPS are characterized as environmentally sustainable, as they enable high forage production with significant nutritional value and efficient use of applied nitrogen.

Keywords: bromatology, forage production, *Lolium multiflorum*, nitrogen use efficiency, regenerative agriculture

1 Introdução

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) estabeleceu o compromisso com a comunidade global da “Fome Zero” até 2030 (Xiong e Lian, 2026). Essa meta esbarra nos desafios globais da fome e da má nutrição que permanecem graves (Fanzo et al., 2024), principalmente devido às mudanças climáticas (Elkhalfi et al., 2025) exigindo sistemas produtivos mais sustentáveis e resilientes.

Os avanços na produção de alimentos obtidos após a revolução verde devem-se à “agricultura baseada em petróleo”, que contribuiu com o aumento da eficiência produtiva e ajudou a reduzir déficits na oferta de alimentos (Eisa et al., 2025). Porém, este modelo produtivo

baseado no consumo excessivo de recursos possui inconvenientes como a degradação do solo e da água de agroecossistemas (Xiong e Lian, 2026) e desafios à sustentabilidade agroambiental (Pereira et al., 2025). Estes são observados nas lavouras de arroz conduzidas sob revolvimento do solo e irrigação por inundação nas terras baixas do Bioma Pampa (Denardin et al., 2025). Nesse agroecossistema, além da supressão da vegetação natural e redução da biodiversidade (Campoli e Stivali, 2026), estão em decadência os índices produtivos do arroz, mesmo sob maior aporte insustentável de insumos externos (Goulart et al., 2020).

Essa realidade soma-se à necessidade mundial de uma urgente transformação agrícola que aumente a resiliência dos sistemas produtivos para enfrentar os desafios emergentes da segurança alimentar (Cao et al., 2025; Fu et al., 2025). Dentre as estratégias de transformação, destaca-se a adoção de modelos de produção pautados na agricultura conservacionista, com princípios de conservação do solo (Baptistella et al., 2020) que podem ser expandidos com a introdução de espécies vegetal e/ou animal por meio dos sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs).

A adoção de SIPAs permite a construção de um sistema circular que integre a produção vegetal e animal (Xiong e Lian, 2026). Nestes, a diversificação dos componentes e aumento da biodiversidade resulta em sistemas produtivos mais resilientes às mudanças climáticas e estresses ambientais (Baptistella et al., 2020). A introdução de espécies vegetais forrageiras fornece serviços ao agroecossistema (Baptistella et al., 2020), como o aumento da eficiência de uso de nutrientes, a proteção do solo, o controle de plantas daninhas e/ou ao incremento da produção e produtividade das culturas principais (Paul et al., 2020). O azevém pode destacar-se como uma cultura de serviço em agroecossistemas do Bioma Pampa por apresentar adaptação às condições ambientais da região, alta capacidade de produção de biomassa e adaptação aos solos de terras baixas (Furquin et al., 2025).

Além da introdução de espécies forrageiras, o uso racional de fertilizantes externos é uma das premissas no manejo sustentável de agroecossistemas. Destes, o nitrogênio (N) é fundamental para o crescimento das plantas e amplamente aplicado na forma de fertilizantes nitrogenados sintéticos (Kumar et al., 2025; Garba et al., 2026). Entretanto, é altamente dinâmico e com ciclos biogeoquímicos complexos (Baptistella et al., 2020) e eficiência de uso baixa - 40 a 53% (Garba et al., 2026). Nas perdas de N, preocupam a lixiviação de nitrato (NO_3^-) ocasiona a eutrofização de corpos d'água e a formação de compostos voláteis, com o óxido nitroso (N_2O), um potente gás de efeito estufa (Garba et al., 2026).

O aumento da eficiência de uso do N pode ser obtida por meio de inibidores de nitrificação sintéticos ou biológicos. O uso comercial dos sintéticos é inviável, porém, o uso

dos biológicos, secretados pelas raízes de cereais como o arroz pode ser potencializado (Kumar et al., 2025) com a combinação de espécies. Além dos cereais, a introdução da soja, por se tratar de uma leguminosa com potencial de fixação biológica de N, pode contribuir com aumento da sustentabilidade no uso do N. Assim, embora o arroz seja o maior consumidor de fertilizantes nitrogenados (Kumar et al., 2025), a introdução da soja e de outros cereais como o azevém nos agroecossistemas de produção do arroz pode contribuir com aumento da eficiência de uso do N e da sustentabilidade produtiva.

SIPAs em terras baixas ainda são incipientes, especialmente no que diz respeito ao seu manejo sem irrigação por inundação no arroz e visando o uso sustentável do N. Assim, por meio deste estudo, buscou-se estudar a eficiência biológica de doses de N (0; 50; 100; 150 e 200) na produção de biomassa vegetal, seu valor nutricional para ruminantes e recuperação do fertilizante na biomassa de pastagens de azevém em SIPAs com arroz e soja.

2 Material e métodos

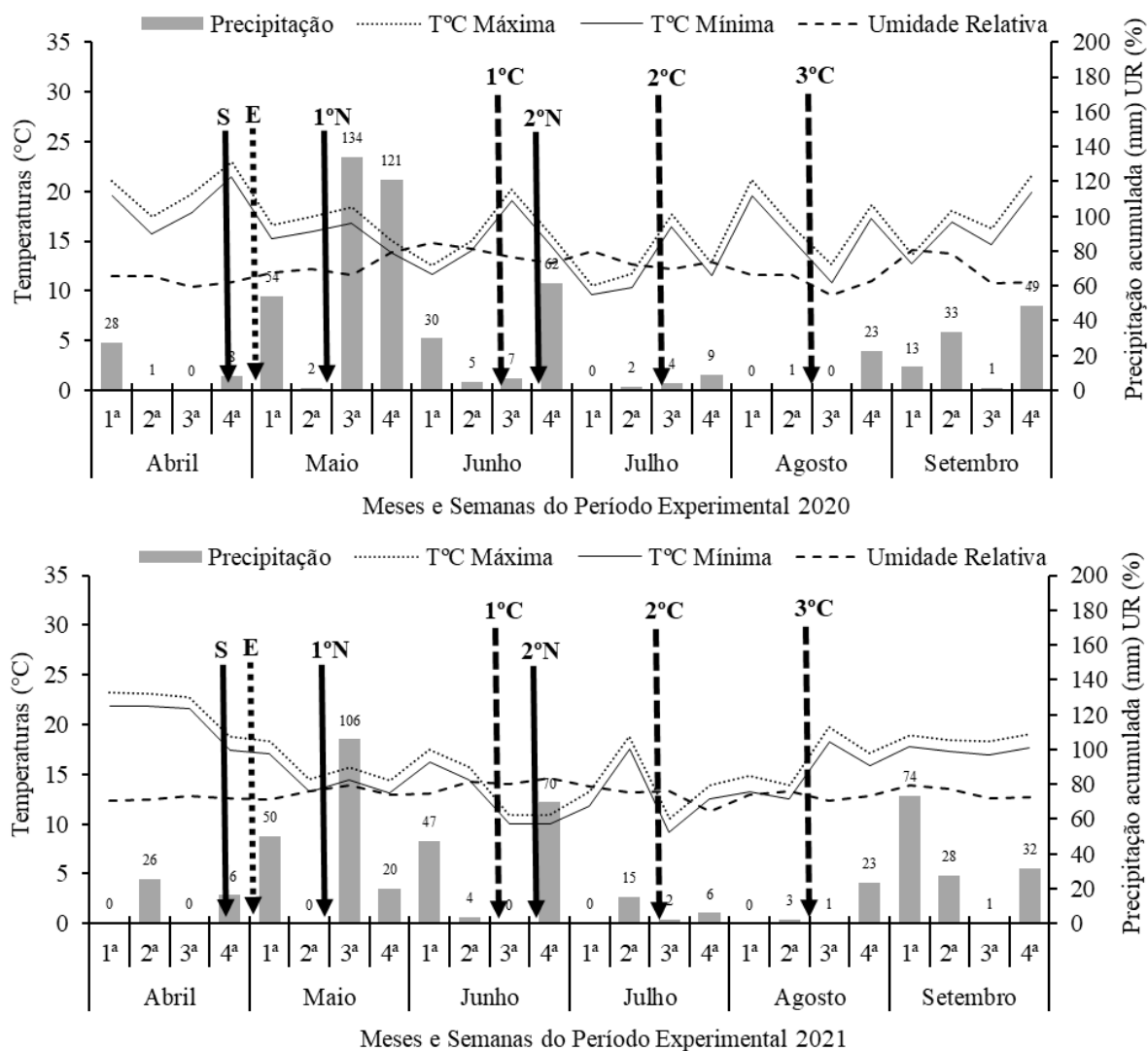
Dois experimentos de campo foram conduzidos para avaliar o efeito combinado das culturas antecessoras e doses de adubação nitrogenada na produção de matéria seca, valor nutricional e eficiência de uso do nitrogênio em solos de terras baixas no Instituto Riograndense do Arroz, sul do Rio Grande do Sul, Brasil, América do Sul.

A Fazenda Experimental está localizada na latitude 29°45'33"N, longitude 57°05'37"E, a uma altitude de 74 m acima do nível médio do mar, na região brasileira do Bioma Pampa na América do Sul. O clima é classificado como Cfa 2, conforme classificação de Köppen, onde a temperatura média do mês mais quente é superior a 22 °C e a temperatura ao longo do ano varia geralmente entre -3 °C e 18 °C. A precipitação é distribuída de forma relativamente uniforme ao longo de todo o ano.

O solo da área experimental é classificado como Chernossolo Ebânico carbonático vértico – MEk (Santos et al., 2025). A análise química revelou as seguintes características: P (Mehlich extractor) 1,4 mg dm⁻³; MO 2%; pH (H₂O) 5,7 mol L⁻¹; H + Al = 4,15 cmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0,0 cmol_c dm⁻³; K = 0,23 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 15,12 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 24,9 cmol_c dm⁻³; CTC = 21,4 cmol_c dm⁻³; Al = 0%; K = 0,37%; Mg K⁻¹ = 74,6; Ca Mg⁻¹ = 2,45; Ca K⁻¹ = 185 (23% areia, 50% silte e 27% argila). Nos dois anos anteriores ao experimento, nos manejos culturais, a área era utilizada para cultivo de arroz de setembro à março, e de azevém de abril à setembro.

Os dados meteorológicos (meses meteorológicos padrão) estão apresentados na Figura 1. A temperatura máxima média mensal variou entre 18,7 e 27,3°C (2020) e 18,5 e 27,5°C

(2021), enquanto a temperatura mínima média mensal variou entre 7,6 e 12,5°C (2020) e 7,9 e 16,7°C (2021). A área recebeu um total de precipitação de 587 mm (2020) e 474,8 mm (2021), considerados dentro da normalidade segundo a média histórica para o período.



Fonte: elaborado pelos autores. S: semeadura; E: emergência; 1ºN: primeira aplicação de nitrogênio (70%); 2ºN: segunda aplicação de nitrogênio (30%); 1ºC, 2ºC e 3ºC: primeiro, segundo e terceiro cortes da forragem, respectivamente.

Fig. 1 - Dados climáticos semanais durante o período experimental, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de azevém Anual em sucessão ao arroz ou soja e sob doses de nitrogênio, em Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

O experimento foi implantado em parcelas subdivididas (split-plot), com a alocação da cultura antecessora (soja ou arroz) nas parcelas, e das doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹) nas subparcelas, com quatro repetições. A área experimental (320 m²) foi dividida em oito parcelas (40 m²: 8 x 5 m cada). Cada parcela foi dividida em quatro subparcelas (10 m²: 2 x 5

m). Esse arranjo configurou ao experimento um total de 32 unidades experimentais.

A colheita da soja e arroz foi realizada em 26 de março (2020) e 29 de março (2021). A amostragem para caracterização da palhada residual nas parcelas foi realizada imediatamente antes da semeadura do azevém. Esta foi realizada em 23 de abril (2020) e 30 de abril (2021), com a emergência das plantas 12 dias após a semeadura. Na semeadura realizada com semeadora tratorizada de fluxo contínuo adotou-se 25 kg ha⁻¹ de sementes de azevém e aplicou-se na linha de semeadura 200 kg ha⁻¹ do fertilizante formulado 05-30-15 (N: P₂O₅: K₂O), e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (00-00-60), baseada na análise de solo e nas recomendações para as culturas (CQFS-RS/SC, 2016). A aplicação do nitrogênio em cobertura foi realizada à lanço 25 dias após a semeadura.

Na pastagem realizou-se três amostragens iniciadas quando a forragem atingiu a altura recomendada para o pastejo que é de 25 cm (Quatrin et al., 2017). Em 2020 as amostragens foram realizadas aos 60, 102 e 138 dias após a semeadura, enquanto em 2021 foram aos 65, 100 e 135 dias após a semeadura. Após cada amostragem, a forragem remanescente em cada parcela experimental foi cortada e removida simulando a realização de pastejos.

Na caracterização dos resíduos culturais do arroz e soja, coletou-se manualmente todos os resíduos culturais existentes na superfície do solo em área amostral de 0,25 m². A amostragem foi realizada em triplicata para cada unidade experimental. As amostras foram, secadas em estufa com circulação forçada de ar a 55°C e pesadas para estimativa da produção de matéria seca de palhada residual. Posteriormente foram trituradas em moinho tipo Willey com facas e câmara de inox e peneira de 1 mm e submetidas a procedimentos laboratoriais para determinação do nitrogênio e carbono total. O nitrogênio foi obtido por digestão sulfúrica e destilação no método semi-micro Kjeldal. O carbono foi determinado segundo o método descrito por Goldin (1987), com incineração das amostras em mufla para obtenção da matéria orgânica e posterior divisão dos valores obtidos pelo fator de 2,00, conforme proposto por Pribyl (2010) que considera que a matéria orgânica possui 50% de carbono orgânico total.

A produtividade de forragem e seu valor nutricional foram estimadas por meio de amostragem realizada em triplicata em cada unidade experimental. Nesta, a forragem contida em área amostral de 0,75 m² foi colhida em altura de 10 cm ao nível do solo, submetida à secagem em estufa com circulação forçada de ar sob temperatura de 55°C. Então obteve-se a massa seca, que foi corrigida para kg/ha.

As amostras secas foram trituradas em moinho tipo Willey, com facas e câmara de inox, em peneira de um milímetro para determinação do valor nutricional da forragem. Nesta foram estimados valores de proteína bruta (PB) (AOAC, 1995), fibra em detergente neutro (FDN)

(Van Soest et al., 1991) e fibra em detergente ácido (FDA) (Van Soest, 1994). A porcentagem de nutrientes digestíveis totais da forragem (%NDT) foi obtida pela equação $\%NDT = 87,84 - (0,70 \times \% FDA)$ proposta por Bolsen (1996). O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV) foi estimado pela equação $1200/FDN$, proposta por Mertens (1994). A DIGMS (% digestibilidade estimada da MS) foi obtida pela equação $DMS = 88,9 - (0,779 \times FDA)$ (Bolsen, 1996). O valor relativo da forragem (VRF) foi obtido pelo estimador $VRF = (DIGMS \times CMSPV) / 1,29$, conforme Bolsen (1996).

A concentração de nitrogênio na matéria seca da forragem foi determinada segundo (AOAC, 1995) obtendo-se sua concentração no tecido vegetal (N%). A absorção total de N foi estimada como o produto da produção de matéria seca da forragem ($kg\ ha^{-1}$) e da concentração de N no tecido vegetal (Baptistella et al., 2020):

$$(1) \text{ Absorção de N } (kg\ N\ ha^{-1}) = PM \times N (\%) / 100$$

Onde:

- **PM** é a produção de matéria seca da pastagem ($kg\ de\ MS\ ha^{-1}$)
- **N (%)** é a concentração de N no tecido vegetal da forragem produzida.

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN) foi estimada como a fração aparente de recuperação do N (Bastidas et al., 2024). Esta foi calculada como a diferença entre a absorção de N no tratamento fertilizado e no tratamento controle de cada parcela, dividida pela dose de N aplicada. O valor foi expresso como porcentagem do N aplicado, utilizando a seguinte fórmula:

$$(2) EUN (\%) = [(NT_{CN} - NT_{SN}) / DN] \times 100$$

Onde:

- **NT_{CN}** é o N absorvido no tratamento fertilizado ($kg\ ha^{-1}$);
- **NT_{SN}** é o N absorvido no tratamento sem fertilização (controle) ($kg\ ha^{-1}$);
- **DN** é a dose de nitrogênio aplicada no tratamento fertilizado ($kg\ ha^{-1}$).

A eficiência agronômica do nitrogênio (EAN) equivale à produção de massa seca (MS) obtida por unidade de nutriente aplicado, é expressa em $kg\ de\ MS\ kg\ N^{-1}$ aplicado e pode ser calculada pela seguinte equação (Fageria, 1998):

$$(3) EAN = MS_{CN} - MS_{SN} / DN$$

Onde:

- MS_{CN} é a MS de forragem produzida no tratamento fertilizado ($kg\ ha^{-1}$);
- MS_{SN} é a MS de forragem produzida no tratamento sem fertilização (controle) ($kg\ ha^{-1}$);
- DN é a dose de nitrogênio aplicada no tratamento fertilizado ($kg\ ha^{-1}$).

A eficiência fisiológica é a produção biológica obtida por unidade de nutriente acumulado expressa em kg de MS $kg\ de\ N^{-1}$ absorvido. É também chamada de eficiência biológica e pode ser calculada pela seguinte equação (Fageria, 1998):

$$(4) \text{EFN} = MS_{CN} - MS_{SN} / NT_{CN} - NT_{SN}$$

- NT_{CN} é o N absorvido no tratamento fertilizado ($kg\ ha^{-1}$);
- NT_{SN} é o N absorvido no tratamento sem fertilização (controle) ($kg\ ha^{-1}$);

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância (ANAVA) pelo teste F de Fisher (5%). Quando significativa a ANAVA, as doses de nitrogênio foram estudadas por meio de análise de regressão, testando-se os modelos linear e quadrático. Para escolha do modelo que melhor explicasse o comportamento dos dados considerou-se a significância dos coeficientes (Teste T de Student ao nível de 5%) e o coeficiente de determinação (R^2).

3 Resultados

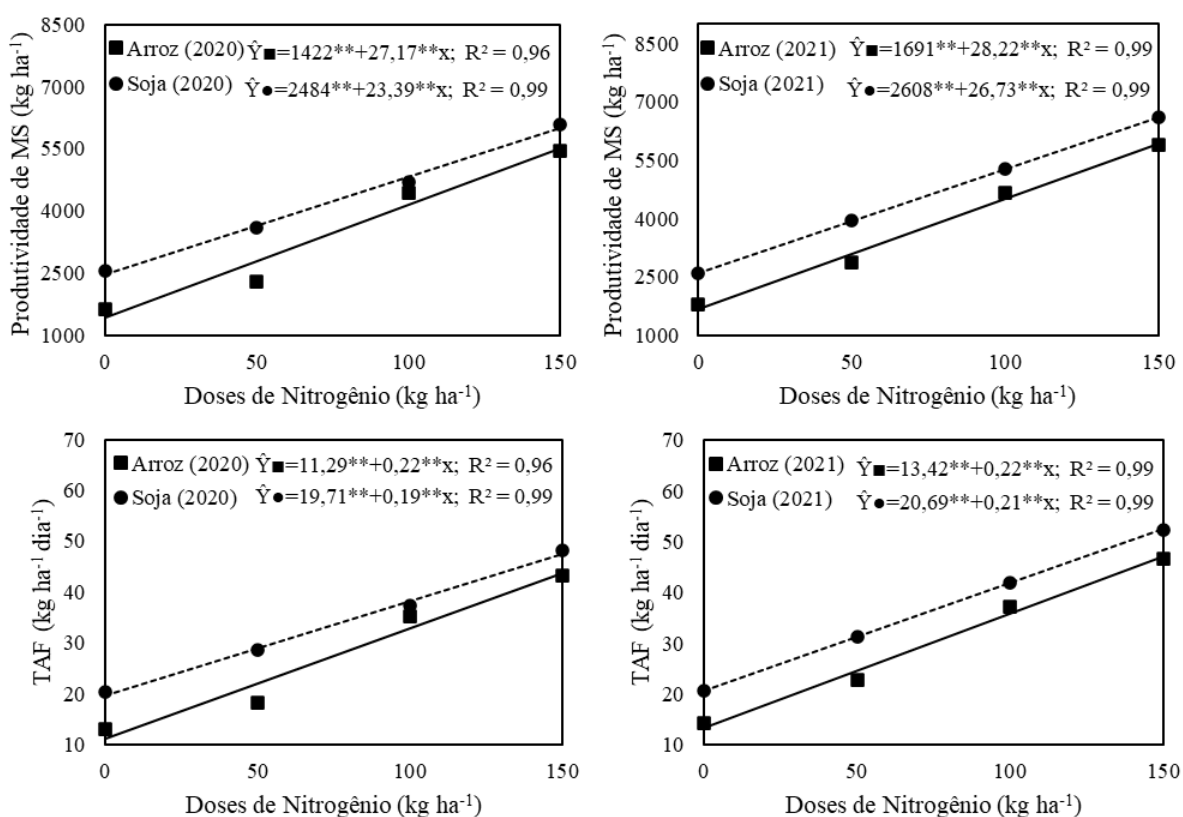
3.1 Resíduos culturais da soja e arroz

Nas duas safras, 2020 e 2021 houve significância para a palhada residual ($P=0,000$), onde o arroz foi superior à soja. Os valores obtidos para as restebas de arroz e soja foram de 1805 e 1644 $kg\ ha^{-1}$ no ano de 2020 e 1656 e 1485 $kg\ ha^{-1}$ no ano de 2021, respectivamente.

Em se tratando da relação C:N nas palhadas, também houve significância das culturas nos dois anos de avaliações ($P=0,000$). No ano de 2020 a relação C:N foi de 100:1 na palhada de arroz, e 69:1 na palhada de soja, enquanto no ano de 2021, a diferença entre as palhadas também se manteve, com 94:1 e 61:1 nas palhadas de arroz e soja, respectivamente.

3.2 Produção de matéria seca (PMS) e taxa de acúmulo de forragem (TAF)

Na produção de matéria seca (PMS) e taxa de acúmulo de forragem (TAF), após os três ciclos de avaliações da forragem nos dois anos (2020 e 2021), foi observado diferenças entre as culturas antecessoras ($P=0,000$), com superioridade da soja, bem como, efeitos das doses de N (Fig. 2). Nestes, as respostas se ajustaram ao modelo linear positivo de regressão em todas as avaliações, com incrementos de 27 e 23 (2020), e 28 e 27 (2021) kg de MS para cada kg de N aplicado no azevém anual semeado após o arroz ou soja, respectivamente (Fig. 2). As respostas foram positivas até a dose máxima de N estudada (150 kg ha^{-1}). Esta proporcionou aumentos na PMS de 232 e 229% no azevém crescendo após arroz, que corresponderam à PMS acumuladas nos três cortes de 5452 e 5889 kg ha^{-1} em 2020 e 2021, respectivamente. Na pastagem de azevém anual semeada após a soja, os aumentos na PMS com a dose máxima de N foram de 138 e 154%, equivalendo a PMS acumulada de 6084 e 6603 kg ha^{-1} em 2020 e 2021, respectivamente (Fig. 2).



**Significativo pelo teste T de Student (1%). Fonte: elaborado pelos autores.

Fig. 2 - Produtividade de matéria seca (MS) (kg ha^{-1}) e taxa de acúmulo de forragem - TAF ($\text{kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) em pastagens de Azevém anual, cultivadas em sucessão à soja ou arroz e, fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes, realizados de abril a setembro, nos anos de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

3.3 Valor nutricional da forragem produzida

No valor nutricional da forragem produzida são apresentados os dados médios dos dois anos de avaliações e das pastagens crescendo após as lavouras de arroz e soja, pois observou-se apenas efeito dos cortes ($P=0,000$) e doses de N ($P=0,000$) (Tab. 1). Na proteína bruta (PB), no primeiro, segundo e terceiro cortes, os incrementos foram de 0,40; 0,23 e 0,13 g kg⁻¹ de PB para cada kg de N aplicado. Os maiores teores de PB foram obtidos com a dose máxima de N (150 kg ha⁻¹), permitindo a obtenção de forragem com teores de PB de 188, 154 e 128 g kg⁻¹ no primeiro (C1), segundo (C2) e terceiro (C3) cortes, respectivamente. Os aumentos obtidos com a aplicação de 150 kg de N ha⁻¹ corresponderam a 45; 30 e 18% para os cortes C1, C2 e C3, respectivamente, em relação à ausência de adubação nitrogenada. Em todas as doses de N estudadas, a PB foi reduzida com o avanço do ciclo de crescimento da forrageira, com reduções de 20; 29; 44 e 47% do C1 para o C3, nas doses de N 0, 50, 100 e 150 kg ha⁻¹, respectivamente.

A fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) foram alteradas pelas doses de N e pelos ciclos forrageiros (C1, C2 e C3) (Tab. 1). As respostas do FDN e FDA às doses de N foram lineares, com aumentos até a dose máxima de N de 150 kg ha⁻¹. Entretanto, apesar das doses terem elevado estes parâmetros, ao serem comparadas a forragem produzida sem uso de adubação nitrogenada em cobertura e na dose máxima de N, os aumentos foram discretos, com percentuais de 11; 16 e 6 para primeiro, segundo e terceiro cortes no FDN, e 14; 13 e 15% na FDA, respectivamente. Esses aumentos nos constituintes fibrosos não impactam negativamente no valor forrageiro da pastagem, pois são compensados pela maior PMS viabilizada pela adubação. Ainda, em todas as adubações, o FDN e FDA aumentaram do primeiro para o terceiro ciclo de crescimento da forragem (Tab. 1)

Em todos os demais parâmetros nutricionais estudados foi observada redução linear com a aplicação das doses de N e com o avanço dos cortes avaliados (Tab. 1). O consumo de matéria seca estimado em percentual do peso vivo (CMSPV) apresentou reduções de 11; 13 e 6% nos cortes C1, C2 e C3 quando comparadas a ausência de aplicação de N e a dose máxima aplicada (150 kg ha⁻¹), além de reduções do C1 para o C3 em todas as doses de N (Tab. 1).

Nos nutrientes digestíveis totais (NDT) também foram observadas reduções com o avanço dos cortes e com o aumento das doses de N. Porém, em nenhum dos cortes o N aplicado com a dose máxima promoveu mais de 10% de redução no NDT, cujos valores obtidos foram de 3, 4 e 7% para os cortes C1, C2, C3, respectivamente.

A digestibilidade da matéria seca (DIGMS) reduziu-se a cada corte avaliado em todas as doses de N, e em resposta à estas, houve redução linear em todos os cortes até a dose máxima do estudo (150 kg ha⁻¹). Nesta, as reduções foram de 4% (C1), 5% (C2) e 7% (C3) em relação à não aplicação de N. Embora as reduções no NDT e DIGMS tenham sido discretas, no valor relativo da forragem (VRF) as reduções foram mais expressivas, com percentuais de redução de 15 (C1), 18 (C2) e 13 (C3) na máxima aplicação de N.

Tab. 1 – Valor nutricional da forragem produzida por pastagens de Azevém anual fertilizadas com doses de nitrogênio em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

Itens	Doses de Nitrogênio (kg ha ⁻¹)				<i>p-Value</i>		Equação	EPM
	0	50	100	150	L	Q		
Proteína Bruta (g kg⁻¹)								
C1	129a	145a	173a	188a	0,000	0,994	Ŷ=128***+0,40**x; R²=0,99	1,06
C2	119b	128b	138b	154b	0,000	0,432	Ŷ=117***+0,23**x; R²=0,98	
C3	108c	113c	120c	128c	0,002	0,906	Ŷ=107***+0,13**x; R²=0,99	
Fibra em Detergente Neutro (g kg⁻¹)								
C1	440c	457c	474c	487c	0,000	0,608	Ŷ=440***+0,32**x; R²=0,99	4,87
C2	527b	548b	582b	610b	0,000	0,497	Ŷ=524***+0,56**x; R²=0,99	
C3	624a	637a	647a	661a	0,000	0,874	Ŷ=624***+0,24**x; R²=0,99	
Fibra em Detergente Ácido (g kg⁻¹)								
C1	228c	238c	251c	260c	0,000	0,903	Ŷ=227***+0,22**x; R²=0,99	4,63
C2	315b	325b	342b	357b	0,000	0,581	Ŷ=313***+0,28**x; R²=0,99	
C3	381a	402a	419a	440a	0,000	0,941	Ŷ=382***+0,39**x; R²=0,99	
Consumo de Matéria Seca em percentual do Peso Vivo (%)								
C1	2,88a	2,74a	2,61a	2,55a	0,000	0,057	Ŷ=2,85**-0,0022**x; R²=0,98	0,02
C2	2,28b	2,20b	2,07b	1,98b	0,005	0,855	Ŷ=2,28**-0,0021**x; R²=0,99	
C3	1,95c	1,90c	1,87c	1,84c	0,001	0,920	Ŷ=1,94**-0,0007**x; R²=0,99	
Nutrientes Digestíveis Totais (g kg⁻¹)								
C1	719a	711a	703a	696a	0,000	0,903	Ŷ=719**-0,15**x; R²=0,99	3,24
C2	658b	651b	639b	629b	0,000	0,581	Ŷ=659**-0,20**x; R²=0,99	
C3	612c	597c	585c	570c	0,000	0,941	Ŷ=611**-0,27**x; R²=0,99	
Digestibilidade da Matéria Seca (g kg⁻¹)								
C1	712a	703a	694a	686a	0,000	0,903	Ŷ=711**-0,17**x; R²=0,99	3,61
C2	644b	636b	623b	611b	0,000	0,581	Ŷ=645**-0,22**x; R²=0,99	
C3	592c	576c	562c	546c	0,000	0,941	Ŷ=591**-0,30**x; R²=0,99	
Valor Relativo da Forragem (%)								
C1	159a	149a	140a	135a	0,000	0,063	Ŷ=157**-0,15**x; R²=0,98	1,09
C2	114b	108b	100b	94b	0,000	0,754	Ŷ=114**-0,14**x; R²=0,99	
C3	90c	85c	82c	78c	0,000	0,862	Ŷ= 89**-0,08**x; R²=0,99	

**Significativo pelo teste T de Student (1%). p-Value: significância pelo teste F de Fisher na análise de variância dos modelos linear (L) e quadrático (Q). EPM: erro padrão da média. Fonte: elaborado pelos autores.

3.4 Concentração de absorção de N na forragem

Para compreensão do aproveitamento do N pela pastagem foram estimados os aportes de N que poderiam ser obtidos a partir das palhadas residuais. Estes foram estimados por meio da determinação da concentração de N nos resíduos culturais e da produção total destes pelas culturas do arroz e soja. Nos dois anos de avaliações, houve significância ($P=0,000$) das culturas de verão no aporte de N, com superioridade da soja. Em 2020, os aportes obtidos a partir das lavouras de arroz e soja foram de 9,31 e 11,94 kg ha⁻¹, enquanto em 2021 foram de 9,02 e 11,80 kg ha⁻¹, respectivamente.

Tab. 2 – Concentração e absorção de nitrogênio na forragem produzida por pastagens de Azevém anual, cultivadas em sucessão à soja ou arroz, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

	Doses de N (kg ha ⁻¹)				<i>p-Value</i>		Equação	EPM
	0	50	100	150	L	Q		
Concentração de N na MS da forragem (%)								
2020								
Arroz	1,79a	1,91b	1,97b	2,18b	0,000	0,210	Ŷ=1,78**+0,0024**x; R²=0,94	0,02
Soja	1,81a	1,99a	2,26a	2,45a	0,000	0,852	Ŷ=1,80**+0,0044**x; R²=0,99	
2021								
Arroz	1,86a	1,99b	2,13b	2,34b	0,000	0,304	Ŷ=1,84**+0,0032**x; R²=0,99	0,02
Soja	1,89a	2,03a	2,27a	2,44a	0,000	0,723	Ŷ=1,87**+0,0039**x; R²=0,99	
Absorção de N na MS da forragem (kg N ha ⁻¹)								
2020								
Arroz	29b	44b	87b	119b	0,000	0,140	Ŷ=23**+0,62**x; R²=0,97	1,34
Soja	46a	72a	106a	149a	0,000	0,849	Ŷ=42**+0,69**x; R²=0,99	
2021								
Arroz	33b	57b	99b	138b	0,000	0,304	Ŷ=29**+0,71**x; R²=0,99	0,97
Soja	49a	80a	120a	161a	0,000	0,723	Ŷ=46**+0,75**x; R²=0,99	

**Significativo pelo teste T de Student (1%). *p-Value*: significância pelo teste F de Fisher na análise de variância das dos modelos linear (L) e quadrático (Q). EPM: erro padrão da média. Fonte: elaborado pelos autores.

Na concentração de N da forragem produzida houve significância da cultura antecessora em 2020 e 2021 ($P=0,000$), com superioridade da soja em todas as doses de N aplicadas (Tab. 2). Em resposta ao aumento das doses de N, a concentração de N na matéria seca da forragem produzida elevou-se linearmente até a dose máxima aplicada. Esta proporcionou aumentos de

22 e 35% (2020); e 26 e 29% (2021) na forragem do azevém anual crescendo após arroz ou soja, respectivamente.

Estes resultados associados aos obtidos com a PMS potencializaram a absorção de N na matéria seca (MS) da forragem, que também foi superior na sucessão com a soja em todas as doses de N, e respondeu linearmente até a dose máxima em todas as avaliações (Tab. 2). Na ausência de aplicação de N em cobertura, a soja como cultura precedente proporcionou absorções de N na MS da forragem do azevém anual 57 e 48% superiores ao arroz em 2020 e 2021, respectivamente, permitindo absorções de 46 e 49 kg de N ha⁻¹. A superioridade da soja se manteve nas demais doses aplicadas, de forma que na dose máxima de N (150 kg ha⁻¹), embora as diferenças tenham sido menores, a soja proporcionou absorções 25 e 17% superiores ao arroz em 2020 e 2021, respectivamente. As absorções de N próximas ou superiores a dose aplicada, observadas na dose máxima e também nas demais doses evidenciam o potencial de aproveitamento do N para os sistemas estudados com a inclusão da soja na rotação de culturas.

Entretanto, ao se considerar as doses de N 0 e 150 kg ha⁻¹, a absorção de N foi mais potencializada no azevém após o arroz com absorções de N que se elevaram de 29 para 119 kg ha⁻¹ (2020) e 33 para 138 kg ha⁻¹ (2021), resultando em incrementos de 304 e 314%, respectivamente (Tab. 2).

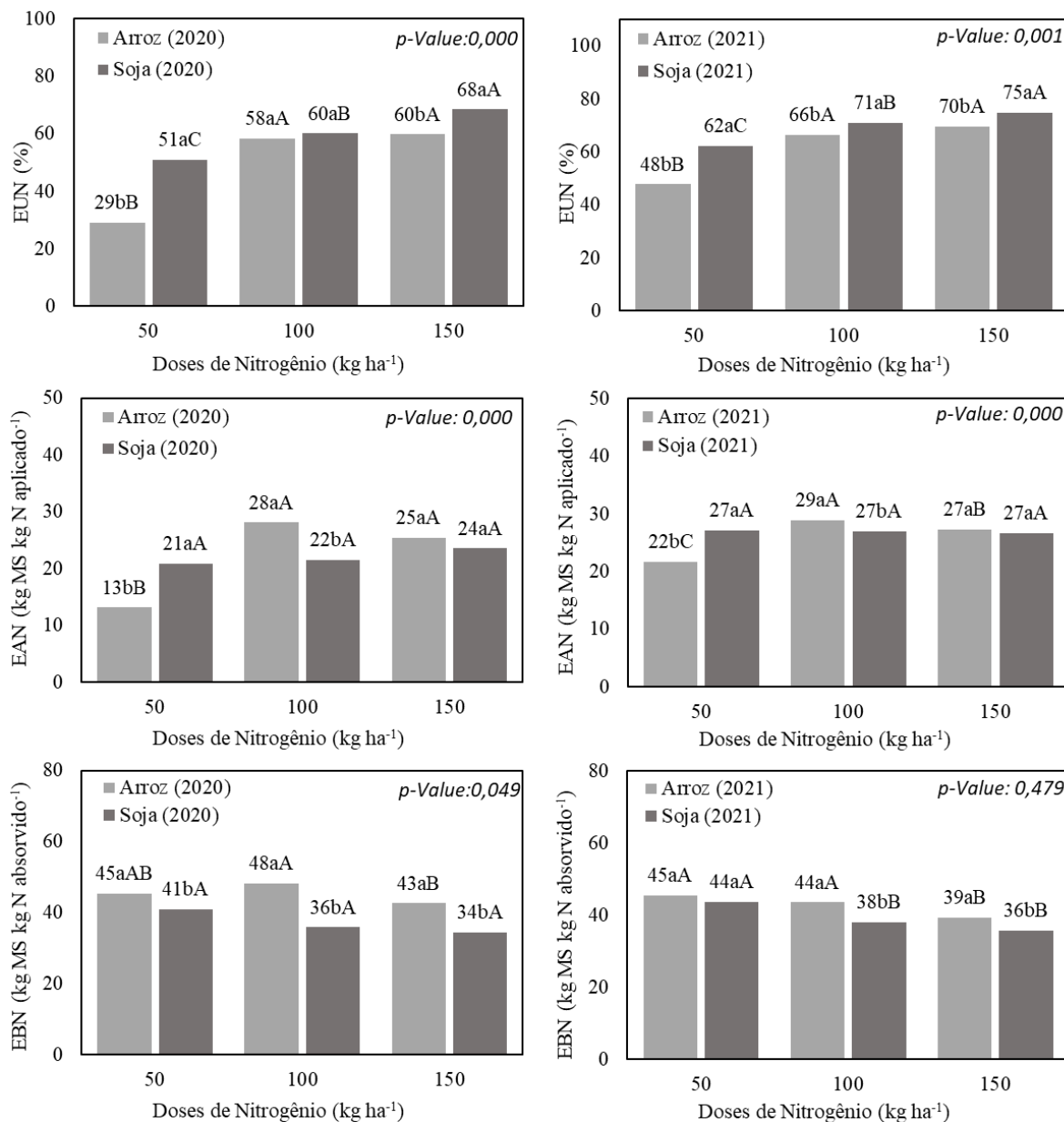
3.5 Parâmetros de eficiência de uso do N

A partir dos resultados obtidos para concentração e absorção de N na MS da forragem de azevém anual estimou-se a eficiência de uso do N (EUN), a eficiência agronômica do N (EAN) e a eficiência biológica do N (EBN), para as quais houve significância das culturas antecessoras e doses de N aplicadas (Fig. 3). Em 2020 e 2021 a EUN foi superior na forragem cultivada após a soja, e ao serem comparadas as doses, foi superior na dose de N 150 kg ha⁻¹, independente da cultura antecessora (Fig. 3). As diferenças mais expressivas no aumento da EUN comparando restevas de arroz e soja foi obtida com a dose de N de 50 kg ha⁻¹, com aumentos de 75 e 30% em 2020 e 2021, respectivamente.

A EAN destacou-se no azevém semeado após a lavoura de arroz e fertilizado com a dose de N de 100 kg ha⁻¹, onde foi possível a obtenção de 28 e 29 kg de MS de forragem para cada kg de N aplicado em 2020 e 2021, respectivamente (Fig. 3).

Em 2020, a EBN foi superior no azevém após arroz e sob dose de N de 100 kg ha⁻¹ (48 kg de MS kg de N aplicado⁻¹), enquanto em 2021 a dose de N de 50 kg ha⁻¹ permitiu a obtenção

das maiores EBN no arroz e soja (45 e 44 kg de MS kg de N aplicado⁻¹, respectivamente), com redução da EBN nas demais doses (Fig. 3).



p-Value: significância pelo teste F de Fisher (5%). Letras minúsculas comparam culturas antecessoras (arroz e soja) e letras maiúsculas comparam doses de nitrogênio. Fonte: elaborado pelos autores.

Fig. 3 – Eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Azevém anual, semeadas após lavouras de arroz ou soja e fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

4 Discussão

As condições climáticas durante o crescimento das pastagens de azevém foram favoráveis, com distribuição adequada das precipitações e ocorrência destas após as aplicações da adubação nitrogenada (Fig. 1).

A menor produção de palhada pela soja em 2020 (1644 kg ha⁻¹) e 2021 (1845 kg ha⁻¹) justifica-se pela maior concentração de N (arroz-51%; soja-0,73%), que favoreceu maior aporte de N na palhada (arroz 9 e soja 12 kg ha⁻¹) e a obtenção de resíduos culturais com menor relação carbono: nitrogênio (C:N). Em 2020 e 2021 a relação C:N na soja foi de 69 e 61:1; enquanto no arroz atingiu valores de 100 e 94:1, respectivamente.

A relação C:N obtida para os resíduos da soja, embora inferior à do arroz ainda é considerada elevada, porém, compatível com a relação C:N dos resíduos culturais normalmente adicionados ao solo pelas culturas (Kumar e Sindhu 2026). Conhecer a relação C:N dos resíduos culturais é fundamental porque ela interfere diretamente nos processos de mineralização e imobilização que fazem parte do ciclo do N no solo. Na mineralização, as formas orgânicas de N presentes nos resíduos são transformadas em formas solúveis assimiláveis por microrganismos e plantas (Gilmour et al., 2020; Gan et al., 2022; Kasmerchak et al., 2025), enquanto na imobilização o N mineral do solo é imobilizado em proteínas moléculas orgânicas dentro das células dos microrganismos, passando para a forma orgânica e indisponível para absorção pelas plantas (Wang et al., 2024; Kumar e Sindhu, 2026).

A mineralização permite a reciclagem de nutrientes, aumento da fertilidade do solo e do rendimento das culturas (Bhatia e Sindhu, 2024), mas é afetado pelas condições ambientais, atividade microbiana, matéria orgânica do solo (MOS), tipo de resíduos culturais (Kumar e Sindhu, 2026). Temperaturas mais elevadas (acima 10°C), disponibilidade hídrica no solo (90% da capacidade de campo), teor de MOS (superior a 5%) favorecem a atividade microbiana e a mineralização do N. Neste estudo, a distribuição uniforme das chuvas e temperaturas obtidas (Fig. 1) foram favoráveis à atividade microbiana, que pode ter sido limitada na ausência de aplicação de N devido aos baixos teores de MOS (2%). Ainda, o cultivo de leguminosas, devido à fixação biológica do N e incorporação de resíduos culturais com menor relação C:N favorece a microbiota mineralizadora, contribuindo com maiores taxas de mineralização (Fontaine et al., 2023; Hussain et al., 2023).

Neste estudo a relação C:N dos resíduos obtidos pode ter atuado regulando a mineralização do N e sua disponibilização para as plantas, afetando os resultados obtidos. A faixa de relação C:N entre 25:1 e 30:1 é considerada como a faixa de equilíbrio entre os

processos de mineralização e imobilização (Grzyb et al., 2020). Relações inferiores aceleram a mineralização, favorecendo as perdas de N por lixiviação e nitrificação, enquanto acima de 33:1 a imobilização pode restringir a disponibilidade de N para as culturas (Kumar e Sindhu, 2026).

Mesmo que a imobilização num primeiro momento possa parecer desfavorável, ela é importante para sustentabilidade dos sistemas produtivos, pois é fundamental na regulação da resiliência dos ecossistemas do solo, protegendo-os da contaminação por fertilizantes, retardando a perda de N dos fertilizantes nitrogenados por lixiviação ou volatilização de componentes gasosos (Kumar e Sindhu 2026). Assim, os ciclos de imobilização e mineralização garantem o impacto benéfico de longo prazo do N sobre a fertilidade do solo e a nutrição das plantas.

Embora neste estudo todos os resíduos culturais possuíam relação C:N acima de 40:1, que favorece a decomposição lenta, com mineralização líquida a partir de 2-4 semanas (Kumar e Sindhu, 2026), a adubação na semeadura, que contemplou a adição de N em 10 kg ha⁻¹ foi suficiente para promover o desenvolvimento inicial da cultura do azevém até a aplicação das doses crescentes. Esse aporte inicial de N com precipitação de 8 mm (2020) e 16 mm (2021) (Fig. 1) logo após a semeadura do azevém assegurou a disponibilidade do nutriente para o estabelecimento das plantas de azevém e seu crescimento inicial.

Esse efeito permitiu altas produções de matéria seca (PMS) e taxas de acúmulo de forragem (TAF) mesmo na ausência da aplicação de adubação nitrogenada em cobertura nos dois anos do estudo (Fig. 2). Em 2020 e 2021, o azevém após soja apresentou PMS de 2557 e 2597 kg ha⁻¹, valores 56 e 45% superiores aos obtidos para o azevém após arroz (1641 e 1789 kg ha⁻¹, respectivamente). Nas TAF os mesmos percentuais de aumento foram observados ao serem comparadas as culturas (Fig. 2). Considerando a padronização da adubação nitrogenada na semeadura (10 kg de N ha⁻¹) e o isolamento dos efeitos de solo por meio do delineamento em blocos casualizados, as diferenças na PMS e TAF na ausência da aplicação de N em cobertura podem ser atribuídas às características dos resíduos culturais e os processos biológicos envolvidos com a disponibilização dos nutrientes nele contidos e descritos anteriormente. Cabe ainda ressaltar, que os resíduos culturais possuem outros nutrientes além de C e N, como fósforo (P), potássio (K) e enxofre (S), que não foram mensurados neste estudo, mas que também são disponibilizados por meio da mineralização e são utilizados pelas plantas (Santos et al., 2022).

A superioridade no azevém semeado após a soja, assim como as respostas às doses de N, que contribuíram com aumento de 27 e 23 kg de MS para cada kg de N aplicado no arroz e soja em 2020 e 28 e 27 kg de MS para cada kg de N aplicado nas culturas em 2021 (Fig. 2)

devem-se aos benefícios proporcionados pela disponibilização do N às plantas. Essa disponibilização ocorre a partir de três fontes principais, que são a decomposição da MOS, a fixação biológica do N e a adubação nitrogenada mineral (Ladha et al., 2022). As duas primeiras fontes foram as responsáveis pelo fornecimento de N às plantas na ausência de adubação nitrogenada em cobertura, enquanto o N mineral fornecido por meio das doses promoveu os incrementos na PMS e TAF (Fig. 2).

Os resultados devem-se ao N absorvido pois este nutriente é crucial para a produtividade das culturas, pois tem relação direta com o acúmulo de matéria seca e transporte de nutrientes nas plantas são fatores críticos para a produtividade agrícola (Sun et al., 2024). Após a absorção em sua forma mineral pelas raízes, o N é assimilado em formas orgânicas, como aminoácidos, enzimas e diversas proteínas, fundamentais para o crescimento dos tecidos e a divisão celular (Romman et al., 2023). Disponibilidade adequada de N para as plantas aumenta o índice de área foliar (Yue et al., 2022) e o teor de clorofila nas folhas (Yang et al., 2022) com maior absorção da radiação luminosa, sua conversão em energia e geração de ATP (Verdenal et al., 2021). Esses benefícios associados ao aumento da respiração permitem maior assimilação de CO₂ (Bonelli e Andrade, 2020) e maior eficiência fotossintética (Wang et al., 2024), resultando em maior acúmulo de matéria seca pelas plantas. Assim, a eficiência com que o N absorvido é assimilado e redistribuído ao longo do ciclo da cultura depende da integração entre absorção radicular, metabolismo fotossintético e translocação de nutrientes, reforçando a importância de práticas de manejo que favoreçam esses processos fisiológicos (Li et al., 2024; Sun et al., 2024), como as adotadas neste estudo.

O aumento linear da PB em resposta às doses de N (Tab. 1) deve-se ao maior aporte deste nutriente no solo, que permitiu o aumento da concentração de aminoácidos e da síntese proteica no metabolismo vegetal (Delevatti et al., 2019). A adubação nitrogenada aplicada favoreceu não somente a absorção do N mineral oriundo das doses aplicadas, mas também do N mineralizado da MOS e dos resíduos culturais pela ação dos microrganismos no solo. As enzimas proteolíticas secretadas pelos microrganismos realizam a proteólise, com a liberação de peptídeos e aminoácidos, e estes podem ser absorvidos por bactérias e plantas neste formato orgânico (Kumar e Sindhu, 2026). Ainda, plantas e microrganismos ajustam-se às condições de disponibilidade de N no solo, de forma que a relação C:N dos exsudatos radiculares pode ser modificada para fornecimento de N aos microrganismos e aumento das taxas de decomposição da MOS e mineralização do N (Fan et al., 2022; Zhou et al., 2022). Essa dinâmica justifica os teores de PB da forragem na ausência da aplicação do N em cobertura (Tab.1). A redução proteica com o avanço dos cortes de avaliação da forragem é uma característica biológica das

plantas forrageiras, que ao envelhecerem, depositam mais parede celular na sua matéria seca, diluindo os teores de PB.

O aumento linear das fibras em detergente neutro (FDN) e ácido (FDA) em resposta às doses de N (Tab. 1) devem-se ao efeito do nutriente no ciclo de crescimento das plantas. Sob suprimento adequado e aumento de suprimento de N, gramíneas otimizam o uso de luz e nutrientes e aumentam o crescimento vegetativo para aumentar a capacidade competitiva, retardando o florescimento e alongando o ciclo vegetativo (Zhang et al., 2022). Entretanto, esse aumento do crescimento vegetativo ocasiona nas plantas maior índice de área foliar e alongamento de colmos, resultando em plantas mais pesadas. Para sustentar o peso das folhas e demais estruturas as plantas aumentam a parede celular das células (Delevatti et al., 2019) por meio do direcionamento do carbono fotossintético os colmos, o que resulta em redução do valor nutritivo da forragem (Battiston et al., 2020).

Os teores de FDN e FDA possuem correlações negativas com o consumo de forragem e com seu valor nutricional (Van Soest, 1994; Mertens, 1997), porém, não devem ser interpretados como negativos em pastagens sob doses de N, pois o aumento destes constituintes é compensado pelas maiores PMS e TAF de forragem. Sob condições de pastejo, TAF e PMS mais elevadas resultam em maior crescimento da pastagem permitindo aos animais maior oportunidade de seleção das porções mais nutritivas das plantas, resultando no consumo de uma dieta com maior valor nutricional.

O aumento nos teores de FDN e FDA com o decorrer das avaliações (cortes) realizados nas pastagens de azevém (Tab. 1) devem-se à entrada das plantas em estágio reprodutivo. Embora a fase reprodutiva possa ser postergada pelo prolongamento da fase vegetativa sob condições de fornecimento de N, em culturas anuais as fases fenológicas são cumpridas, e o florescimento é a mudança de fase que se refere à transição do estágio vegetativo para o estágio reprodutivo (Zhang et al., 2022). Nessa fase, as plantas alongam os colmos rapidamente, aumentando sua participação na massa seca da forragem, e os tornam mais lignificados, reduzindo o valor nutricional da forragem ofertada como um todo devido ao aumento nos teores de FDN e FDA.

O processo acima descrito e o aumento das doses de N reduziram linearmente a capacidade de consumo de matéria seca expressa em percentual do peso vivo (CMSPV) (Tab.1), embora todos os valores se mantiveram acima de 1,8% do PV. Sob condições de pastejo onde a forragem representa a principal ou única fonte alimentar dos animais este parâmetro deve ser mensurado e observado. Trata-se de uma relação direta com o FDN, que representa a lignina, celulose e hemicelulose da parede celular dos vegetais. Enquanto a lignina

é indigestível a celulose e a hemicelulose são potencialmente aproveitáveis. Por se tratarem de carboidratos de digestão lenta no metabolismo ruminal, forragens com elevados teores de FDN requerem mais tempo para digestão microbiana no rúmen, reduzindo a taxa de passagem e a capacidade de consumo de matéria seca pelos animais (Mertens et al., 1996).

Categorias de bovinos de maior exigência nutricional como vacas leiteiras requerem um CMSPV próximo ou superior a 3% do PV, enquanto em bovinos de corte adultos em manutenção a dieta pode ser preconizada em 2% do PV em CMSPV. Assim, a partir da estimativa do CMSPV das forragens pode-se proceder o nível de sua inclusão nas dietas, bem como a categoria mais indicada para consumo de cada pastagem.

O NDT reflete a proporção do alimento que poderia ser utilizada no metabolismo animal para o fornecimento de nutrientes. Sua mensuração em alimentos para ruminantes trata-se de um relevante índice nutricional de um alimento destinado à alimentação animal (Neumann et al., 2024). Neste estudo, a redução linear do NDT em resposta às doses de N e redução do primeiro para o terceiro cortes (Fig. 1) deve-se à deposição dos constituintes da parede celular confirmados pelos resultados obtidos nos teores de FDN e FDA. Aumentos destas frações resultam em redução do aproveitamento dos demais nutrientes da forragem, reduzindo o NDT.

Na digestibilidade da matéria seca (DIGMS) a redução linear com as doses de N e ao longo dos cortes também se justifica pelo aumento do FDN e FDA (Tab. 1). Este parâmetro nutricional revela a proporção da matéria seca que pode ser digerida com a liberação dos seus nutrientes. Assim, embora tenham ocorrido reduções na DIGMS, em todas as avaliações os se mantiveram próximos ou superiores a 550 g kg⁻¹ de MS, considerado como limite inferior para adequado consumo e desempenho de ruminantes em condições de pastejo (Cardoso et al., 2014).

Os aumentos no FDN e FDA também afetaram o valor relativo da forragem (VRF) (Tab. 1). Este é um indicador de qualidade em função da proporção de carboidratos estruturais e não estruturais presentes num alimento, e sua mensuração em forragens é fundamenta. Valores próximos ou superiores a 100% refletem maior conteúdo de carboidratos não fibrosos, rapidamente fermentáveis no rúmen (Brandstetter et al., 2019), enquanto valores abaixo de 80% indicam predominância de carboidratos fibrosos, de digestão lenta, ou até indigestíveis, como a lignina (Gayer et al., 2019; Du et al. 2020). Neste estudo, em todas as avaliações realizadas, independente da dose de N aplicada ou da ordem de corte da forragem, os VRF se mantiveram acima de 80% revelando forragens de elevado valor nutricional e indicadas para altos desempenhos de ruminantes em pastejo.

A maior quantidade de N aportado aos sistemas pela palhada de soja (12 kg ha^{-1}) em relação ao arroz (9 kg ha^{-1}) nos dois anos do estudo devem-se à concentração de N nestes resíduos (arroz-51% e soja-73%). Por se tratar de uma leguminosa, a soja possui resíduos culturais com maior concentração de N, além da capacidade de fixação biológica, possuindo maior potencial de aporte de N aos sistemas produtivos (Otto et al., 2024; Dias et al., 2025). A introdução da soja em SIPAs sob plantio direto aumenta a eficiência microbiana na estabilização de resíduos vegetais, com maior teor de N na biomassa microbiana (Denardin et al., 2025) e maior sustentabilidade e resiliência aos sistemas produtivos.

A maior concentração de N na forragem produzida após a soja a partir da dose de N de 50 kg ha^{-1} nos dois anos do estudo (Tab. 2) revela o potencial de fornecimento de N pela palhada de soja via mineralização. Na ausência de adubação nitrogenada em cobertura, as concentrações de N na matéria seca da forragem foram semelhantes quando o azevém foi semeado após a soja ou arroz. Entretanto, ao serem observadas as absorções de N nas mesmas condições, o azevém semeado após a soja absorveu em sua matéria seca 17 e 16 kg de N ha^{-1} a mais do que o azevém semeado após o arroz (Tab.2). Com o aporte de N pela palhada da soja foi de apenas 12 kg ha^{-1} em cada um dos anos do estudo, o N excedente absorvido na palhada do azevém teve origem da fixação biológica e da mineralização da MOS (Ladha et al., 2022).

Os benefícios da introdução da soja ao sistema foram relevados também na absorção de N na forragem produzida pelo azevém após a soja nas demais doses de N (Tab. 1). As aplicações de N de 50; 100 e 150 kg ha^{-1} permitiram a absorção de N em 72; 106 e 149 kg ha^{-1} em 2020, 80; 120 e 161 kg ha^{-1} . As absorções de N obtidas foram muito próximas ou superiores às doses de N aplicadas, confirmando os benefícios da introdução da soja ao sistema para o aproveitamento do N. Ainda, nas mesmas condições, em 2021 as absorções foram superiores a 2020, sugerindo um potencial cumulativo positivo do sistema.

Embora os benefícios tenham sido observados em todas as doses de N, tornaram-se menos expressivos com o aumento das doses, e repetiram-se na absorção de N no azevém crescendo após o arroz (Tab.2). Esse comportamento está de acordo com a Lei dos Rendimentos Decrescentes (Mitscherlich, 1909) e concorda com os resultados obtidos por Delevatti et al., (2019) estudando doses de N em gramíneas tropicais.

A eficiência do uso do N (EUN) também revela os efeitos positivos da soja, com aumento de 75% e 30% na EUN em 2020 e 2021 do azevém semeado após a soja (Fig. 3). As doses de N também aumentaram a EUN no azevém após o arroz e soja em 2020 e 2021 (Fig.3), revelando que a rotação arroz-soja no verão viabiliza maior aproveitamento do N aplicado na pastagem de inverno. Efeitos positivos da soja em rotações com cereais foram obtidas em

estudos e são atribuídas à diversificação de espécies em um sistema produtivo contribui com aumento da fertilidade natural do solo devido à MOS de diferentes origens e à dinâmica das estruturas radiculares, que permite exploração de maior volume de solo com maior absorção de água e nutrientes (Baptistella et al., 2020; Yang et al., 2022; Zou et al., 2024). Ainda, a diversificação da composição dos exsudatos radiculares e da mucilagem, resulta no recrutamento de microbiota específica da rizosfera para cada espécie, promovendo maior interação das plantas com os microrganismos e com os nutrientes do solo (Andreote et al., 2017).

A eficiência agronômica do N (EAN) destacou-se no azevém semeado após o arroz fertilizado com dose de N de 100 kg ha⁻¹ em cobertura (Fig. 3) devido à um equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização que modularam a disponibilização do N para a absorção e uso pelas plantas. O aumento da dose de N de 100 para 150 kg ha⁻¹ não alterou a EAN no azevém após a soja e reduziu discretamente a EAN no azevém após o arroz somente em 2021 (Fig. 3), evidenciando que mesmo com o aumento das doses a EAN ainda se manteve elevada. Estes resultados justificam-se pelo aporte de palhada ao solo viabilizado pelas culturas de verão que melhoram as condições do solo para o crescimento das plantas e contribuem com a disponibilidade e assimilação de nutrientes (Li et al., 2024; Pramanick et al., 2024).

A redução da eficiência biológica do N (EBN) com o aumento das doses (Fig. 3) deve-se ocorre porque em condições de maior absorção de N, para fixação do mesmo na forma de aminoácidos e proteínas, a planta direciona o carbono fixado para a redução do N ao invés de utilizá-lo para o acúmulo de MS (Zayed et al., 2023).

5 Conclusões

Em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) com alternância de culturas no verão, o arroz possui maior potencial para aporte de resíduos e a soja para aporte de N.

Doses de N até 150 kg ha⁻¹ no azevém aumentam a produção de forragem, que compensa as reduções no valor nutricional devido à maior oferta forrageira para o a seleção no pastejo.

SIPAs com alternância de soja ou arroz no verão e azevém manejado sob diferentes doses de N no inverno permitem EUN média de 60%, EAN média de 24 kg MS kg N aplicado⁻¹ e EBN média de 41 kg de MS kg de N absorvido⁻¹ na MS da forragem.

Os SIPAs estudados aumentam a produção forrageira e eficiência biológica do N aplicado revelando-se como alternativa promissora para exploração agropecuária sustentável nas terras baixas do Bioma Pampa.

6 Referências Bibliográficas

- ANDREOTE, F. D.; PEREIRA E SILVA, M. C. Microbial communities associated with plants: learning from nature to apply it in agriculture. **Current Opinion in Microbiology**, v. 37, n. 6, p. 29–34, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2017.03.011>
- BAPTISTELLA, J.L.C.; ANDRADE, S.A.L.; FAVARIN, J.L.; MAZZAFERA, P. Urochloa in Tropical Agroecosystems. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 4, n. 10, p.119, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00119>.
- OTTO, R.; BARTH, G.; VALENCIANO, M.N.; SOARES, J.R.; FRANCISCO, E.A.B.; PROCHNOW, L.I. Eight years of eco-intensification of maize-soybean rotation in south Brazil: Maize grain production and nitrogen fertilizer replacement value. **European Journal of Agronomy**, v. 159, n. 9, 127261, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127261>
- BASTIDAS, M.; VÁZQUEZ, E.; VILLEGAS, D.M.; RAO, I.M.; GUTIERREZ, J.F.; VIVAS-QUILA, N.J.; AMADO, M.; BERDUGO, C.; ARANGO, J. Optimizing nitrogen use efficiency of six forage grasses to reduce nitrogen loss from intensification of tropical pastures. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 367, n. 3, 108970, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108970>.
- BATTISTON, J., HENRIQUE, D. S., MAYER, L. R. R., KÖLLN, R. S., FLUCK, A. C., OLIVEIRA, J. G.; SCHNEIDER, A.E.; FIORELLI, A. B.; FERNANDES, R.A. A. Composição química e cinética de degradação ruminal in vitro de aveia branca cv. URS guapa sob diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 72, n. 2, 581-589. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-11131>.
- BHATIA, T. SINDHU, S.S. Sustainable management of organic agricultural wastes: contributions in nutrients availability, pollution mitigation and crop production. **Discover Agriculture**, v. 2, n.130, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00147-7>
- BOLSEN, K.K. **Silage technology**. In: AUSTRALIAN MAIZE CONFERENCE, 2., 1996, Queensland. [Proceedings] Queensland: Gatton College, 1996. p.1-30.
- BONELLI, L.E., ANDRADE, F.H., Maize radiation use-efficiency response to optimally distributed foliar-nitrogen-content depends on canopy leaf-area index. **Field Crops Research**, v. 247, n. 2, 107557, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107557>.
- BRANDSTETTER, E. V.; PINHO COSTA, K.A.; SANTOS, D.C.; SOUZA, W.F.; COSTA E SILVA, V.; CASTRO DIAS, M.B. Protein and carbohydrate fractionation of Jiggs Bermudagrass in different seasons and under intermittent grazing by Holstein cows. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 41, n. 1, p. 1–7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.43363>.
- CAMPOLI, J.S.; STIVALI, M. Social cost of deforestation in Brazilian biomes. **Journal for Nature Conservation**, v. 91, n. 1, 127189, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127189>
- CAO, T.; XIE, N.; HANIN, W.; QIN, Y. Digital-green synergistic transition, fiscal decentralization and regional green total factor productivity in agriculture. **Journal of**

Environmental Management, v. 385, n. 6, p. 125382, 2025.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125382>

CARDOSO E.S.; SANTANA JUNIOR, H.A.; SANTANA, E.O.C.; FERREIRA, A.H.C.; MACIEL, M.S.; OLIVEIRA, Z.F.; FIGUEIREDO, C.B.; BRITO, J.M. Reguladores de consumo de bovinos em pastagem: recentes avanços. **Revista eletrônica Nutritime**. v. 11, n. 5, p. 3672-3682. 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nutriti.me.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Artigo-271.pdf

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul. UFRGS, 2016.

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A.S.; BARBERO, R.P.; LEITE, R.G.; ROMANZINI, E.P.; RUGGIERI, A.C.; REIS, R.A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>.

DENARDIN, L.G.D.O.; ALVES, L.A.; MARTINS, A.P.; FLORES, J.P.M.; BRAWERS, L.P.; FILIPPI, D.; CAMARGO, F.A.D.O. Enhancing nitrogen use efficiency in paddy fields: the role of livestock integration and rice-soybean rotation. **Field Crops Research**, v. 333, n.1, 110059, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110059>

DIAS, V.O.; RIBAS, G.G.; SOUZA, M.E.A.; SANTANA, D.M.; RAPHAEL, J.P.A.; KHATOUNIAN, C.A.; FAVARIN, J.L. Plant residue quality indices for selecting summer cover crops in tropical environments. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 49, n. 1, e014325, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202549014325>

DU, Z.; RISU, N.; GENTU, G.; JIA, Y.; CAI, Y. Dynamic changes and characterization of the protein and carbohydrate fractions of native grass grown in Inner Mongolia during ensiling and the aerobic stage. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 33, n. 4, p. 556–567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0212>.

EISA, M.; BRONDI, M.; WILLIAMS, C.; HEJL, R.; BALTRUSAITIS, J. From urea to urea cocrystals: A critical view of conventional and emerging nitrogenous fertilizer materials for improved environmental sustainability. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 9, n. 3, 100209, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100209>

ELKHALFI, O.; CHAABITA, R.; GHOUJDAM, M.; ZEHRAOUI, K.; ALAOUI, H.E.L.; BELHAJ, I. The impact of climate change on food security in the Middle East and North Africa: Challenges and adaptation strategies. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 21, n. 6, 101963, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101963>

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16>

FAN, K.; HOLLAND-MORITZ, H.; WALSH, C.; GUO, X.; WANG, D.; BAI, Y.; ZHU, Y.-G.; FIERER, N.; CHU, H., Identification of the rhizosphere microbes that actively consume

plant-derived carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 166, n.3, 108577, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108577>.

FANZO, J.; STEENHUIJSEN PITERS, B.; SOTO-CARO, A.; SAINT VILLE, A.; MAINUDDIN, M.; BATTERSBY, J. Global and local perspectives on food security and food systems. **Communications Earth & Environment**, v. 5, n. 4, 227, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01398-4>

FONTAINE, S.; ABBADIE, L.; AUBERT, M.; BAROT, S.; BLOOR, J.M.G.; DERRIEN, D.; DUCHENE, O.; GROSS, N.; HENNERON, L.; ROUX, X.L.; LOEUILLE, N.; MICHEL, J.; RECOUS, S.; WIPF, D.; ALVAREZ, G. Plant-soil synchrony in nutrient cycles: learning from ecosystems to design sustainable agrosystems. **Global Change Biology**, v. 30, n. 1, p. 1-24. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.17034>

FU, S.; LV, T.; WU, G.; LI, H.; ZHU, L.; ZHANG, X. Discerning changes in carbon emission intensity of cultivated land utilization since agricultural green transformation: Based on the motivation-opportunity-ability (MOA) framework. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 114, n. 6, p. 107946, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107946>

FURQUIN, F.F.; MACHADO, B.F.; FURQUIN, M.D.; POTTER, L. Interaction among fire and sward height increases leaf nitrogen per unit area of annual ryegrass in subtropical grasslands from southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 55, n.9, e20240458, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240458>

GAN, D.; ZENG, H.; ZHU, B. The rhizosphere effect on soil gross nitrogen mineralization: A meta-analysis. **Soil Ecology Letters**, v. 4, p. 144-154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0098-y>

GARBA, I.I.; BUSS, W.; WANG, E.; O'SULLIVAN, C.A.; GUPTA, V.V.S.R.; BENTLEY, A.R.; VERBURG, K. A modelling framework for assessing the plausible impacts of biological nitrification inhibition in cropping systems. **Agricultural Systems**, v. 232, n. 2, 104569, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104569>

GAYER, T. O. et al. Different dry matters content used for the conservation of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in anaerobic environment. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 6, p. 369–378, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13675>.

GILMOUR, J.T. Predicting soil organic matter nitrogen mineralization. **Soil Science Society of American Journal**, v. 85, n.2, p. 353-360, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20203>

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, n. 10, p.1111-1116, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>

GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, n.1, 102715, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102715>

GRZYB, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; NIEWIADOMSKA, A. Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. **Agronomy**, v. 10, n. 12, 1951, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>

GRZYB, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; NIEWIADOMSKA, A., The significance of microbial transformation of nitrogen compounds in the light of integrated crop management. **Agronomy**, v. 11, n. 7, 1415, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11071415>

HUSSAIN, A.; BASHIR, H.; ZAFAR, S.A.; REHMAN, R.S.; KHALID, M.N.; AWAIS, M.; SADIQ, M.T.; AMJAD, I. The importance of soil organic matter (SOM) on soil productivity and plant growth. **Biological and Agricultural Sciences Research Journal**, v.2, n. 1, p.11. 2023. DOI: <https://doi.org/10.54112/basrj.v2023i1.11>

KASMERCHAK, C.S. DAUGHTRIDGE, R.C. MARGENOT, A.J. Differential response of chitinolytic and proteolytic depolymerization-mineralization pathways to organic nitrogen substrates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 61, p. 1215-1234. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01932-2>

KUMAR, S.; SINDHU, S.S. Microbiome-mediated nitrogen cycling in soil: Impact on nitrogen use efficiency, crop production and environmental sustainability, **Soil Security**, v. 22, n. 3, 100225, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2026.100225>.

LADHA, J.K.; PEOPLES, M.B.; REDDY, P.M.; BISWAS, J.C.; BENNETT, A.; JAT, M.L.; KRUPNIK, T.J. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. *Field Crops Research*, v. 283, n. 7, 108541, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108541>

LI, X.; WANG, H.; SUN, S.; JI, X.; WANG, X.; WANG, Z.; SHANG, J.; JIANG, Y.; GONG, X.; QI, H. Optimization of the morphological, structural, and physicochemical properties of maize starch using straw returning and nitrogen fertilization in Northeast China. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 265, n. 1, 130791, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130791>

LIU, D.; XU, L.; WANG, H.; XING, W.; SONG, B.; WANG, Q. Root exudates promoted microbial diversity in the sugar beet rhizosphere for organic nitrogen mineralization. **Agriculture**, v. 14, n. 7, 1094, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071094>

MERTENS, D.R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 80, n.7, p.1463-1481, 1997. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2)

MERTENS, D. R. Formulating dairy rations: using fiber and carbohydrate analyses to formulate dairy rations. In: **Information conference with dairy and forage industries**. Madison: US Dairy Forage and Research Center, 1996.

MITSCHERLICH, E. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtsch Jahrb**, v. 38, n. 1, p. 537–552, 1909.

NEUMANN, M.; BALDISSERA, E.; ALESSI IENKE, L.; MARTINS DE SOUZA, A.; PIEMONTEZ DE OLIVEIRA, P.E.; HARRY BUMBIERIS JUNIOR, V. Nutritional Value

Evaluation of Corn Silage from Different Mesoregions of Southern Brazil. *Agriculture*, v. 14, n. 7, p.1055, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071055>.

OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS. Association of Official Analytical Chemistry, 12 ed. Washington, D.C. 1995.

PAUL, B.K.; GROOT, J.C.J.; MAASS, B.L.; NOTENBAERT, A.M.O.; HERRERO, M.; TITTONELL, P.A. Improved feeding and forages at a crossroads: Farming systems approaches for sustainable livestock development in East Africa. **Outlook on Agriculture**, v. 49, n.1, p. 13–20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1177/0030727020906170>

PEREIRA, P.; INACIO, M.; BARCELO, D.; ZHAO, W. Impacts of agriculture intensification on biodiversity loss, climate change and ecosystem services. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 46, n. 10, 100637, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2025.100637>

PRAMANICK, B.; KUMAR, M.; NAIK, B.M.; SINGH, S.K.; KUMAR, M.; SINGH, S.V. Soil carbon-nutrient cycling, energetics, and carbon footprint in calcareous soils with adoption of long-term conservation tillage practices and cropping systems diversification. **Science of The Total Environment**, v. 912, n. 2, 169421, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169421>

PRIBYL, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v.156, n.3-4, p.75-83, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>

QUATRIN, M. P.; OLIVO, C.J.; MEINERZ, G.R.; FONTANELLI, R.S.; AGUIRRE, P.F.; SEIBT, D.C.; AIRES, J.F.; FALK, D.R.; SAUTER, C.P.; SILVA, A.R. Produtividade de genótipos de trigo duplo propósito submetidos ao pastejo com vacas em lactação. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 69, n. 6, p. 1615-1623, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9470>

ROMMAN, M.; PARVEZ, R.; ADNAN, M.; GUL, F.; HAROON, M.; ULLAH, R.; SAUD, S.; AHMED, N.; HAMEED, I.; NAWAZ, T. Nitrogen-fixing biofertilizers, in: **Biofertilizers for Sustainable Soil Management**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 233–254, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003286233>

SANTOS, A.B.D.; SILVA, M.A.S.D.; STONE, L.F.; HEINEMANN, A.B. Management of rice straw in rice-soybean succession in tropical lowland. **Revista Ceres**, v. 69, n.4, 390–399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040002>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; LIMA, H.N.; MARQUES, F.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 396 p.

SUN, G.; CHEN, S.; ZHANG, S.; CHEN, S.; LIU, J.; HE, Q.; HU, T.; ZHANG, F. Responses of leaf nitrogen status and leaf area index to water and nitrogen application and their relationship with apple orchard productivity. *Agricultural Water Management*, v. 296, n. 3, 108810, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108810>

VAN SOEST, P. V. et al Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of dairy science**, v. 74, n. 10, p. 3583-3597, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2).

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**, 2nd ed. Ithaca: Cornell University press. United States of America, 476p, 1994.

VERDENAL, T.; DIENES-NAGY, Á.; SPANGENBERG, J.E.; ZUFFEREY, V.; SPRING, J.-L.; VIRET, O.; MARIN-CARBONNE, J.; VAN LEEUWEN, C. Understanding and managing nitrogen nutrition in grapevine: A review. **OENO One**, v. 55, n. 1, p. 1-43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2021.55.1.3866>

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. The utilization and roles of nitrogen in plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/F15071191>

WANG, Z.; WANG, J.; WU, H.; YANG, T.; AN, Y.; ZHANG, Y.; BIAN, J.; LI, Y.; REN, H.; LKHAGVA, A.; WANG, X.; YU, Q. Nitrogen addition alters aboveground C:N:P stoichiometry of plants but not for belowground in an Inner Mongolia grassland. **Journal of Plant Ecology**, v. 17, n. 1, rtad041, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtad041>

XIONG, X.; LIAN, H. Assessing the impact of crop–livestock integration on food security: Evidence from the Huang–Huai–Hai region of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 538, n. 1, 147395, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147395>

YANG, L., MUHAMMAD, I., CHI, Y.X., LIU, Y.X., WANG, G.Y., WANG, Y., ZHOU, X.B., Straw return and nitrogen fertilization regulate soil greenhouse gas emissions and global warming potential in dual maize cropping system. **Science of The Total Environment**, v. 853, n. 12, 158370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158370>.

YUE, K., LI, L., XIE, J., WANG, L., LIU, Y., ANWAR, S., Tillage and nitrogen supply affects maize yield by regulating photosynthetic capacity, hormonal changes and grain filling in the Loess Plateau. **Soil Tillage Research**, v. 218, n. 4, 105317, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105317>.

ZAYED, O.; HEWEDY, O.A.; ABDELMOTELEB, A.; ALI, M.; YOUSSEF, M.S.; ROUMIA, A.F.; SEYMOUR, D.; YUAN, Z.-C. Nitrogen Journey in Plants: From Uptake to Metabolism, Stress Response, and Microbe Interaction. **Biomolecules**, v. 13, n. 10, p. 1443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom13101443>.

ZHANG, S.; LIU, Y.; DU, M.; SHOU, G.; WANG, Z.; XU, G. Nitrogen as a regulator for flowering time in plant. **Plant Soil**, v. 480, n.10, p. 1–29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05608-w>

ZHOU, J.; GUILLAUME, T.; WEN, Y.; BLAGODATSKAYA, E.; SHAHBAZ, M.; ZENG, Z.; PEIXOTO, L.; ZANG, H.; KUZYAKOV, Y. Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**. 175, 108850. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108850>.

ZOU, H.; LI, D.; REN, K.; LIU, L.; ZHANG, W.; DUAN, Y.; LU, C. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil

fertility. **Frontiers in Plant Science**, v. 27, n. 15, 1349180, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349180>.

6. CAPÍTULO 3

Desempenho biológico no uso do nitrogênio pela aveia preta após soja ou arroz em SIPAs no Bioma Pampa

Biological nitrogen use efficiency of black oat following soybean or rice in integrated production systems in the Pampa Biome

Lueli Fernandes Bragança¹, Luiza Vandrielli Goulart Unamuzaga¹, Mariana Trindade Barreto², Cleiton José Ramão³, Rodrigo Holz Krolow¹, Henrique da Costa Mendes Muniz¹, Deise Dalazen Castagnara^{1*}

¹Medicina Veterinária, Universidade Federal do Pampa, Rio Grande do Sul, Brasil.
*deisecastagnara@unipampa.edu.br

²Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná, Paraná, Brasil

³Instituto Riograndense do Arroz, Rio Grande do Sul, Brasil

Frontiers in sustainable food systems – JCR 3,1

Edição especial: Integrating grassland leys in crop rotations for sustainable and resilient agricultural systems

Resumo

Objetivou-se mensurar os efeitos da rotação soja-arroz no verão em sucessão com a aveia preta sob doses de nitrogênio (N) no inverno nos aportes residuais do arroz e soja, e parâmetros produtivos, nutricionais e de uso do N na forragem produzida. Os ensaios de campo foram conduzidos em 2020 e 2021, sob delineamentos de blocos casualizados, em parcelas subdivididas, com 4 repetições. Avaliou-se os efeitos das culturas antecessoras nas parcelas (soja e arroz) e das doses de N (0; 50; 100 e 150 kg ha⁻¹) nas subparcelas sobre os resíduos culturais da soja e arroz e a forragem produzida pela aveia preta. Nos resíduos avaliou-se produção de matéria seca (PMS), teor de N, aporte de N e relação carbono: nitrogênio (C:N). Na forragem avaliou-se em três ciclos de crescimento (C1, C2 e C3) a PMS, taxa de acúmulo de forragem (TAF), valor nutricional, teor e extração de N, além das eficiências de uso (EUN), agrônômica (EAN) e biológica (EBN) do N. O arroz aportou mais resíduos (1766 kg ha⁻¹) do que a soja (1656 kg ha⁻¹), porém, com teor de N inferior (54%) à soja (79%), o que resultou em maior aporte de N pela soja (13 kg ha⁻¹) do que pelo arroz (9 kg ha⁻¹) e também menor relação C:N nos resíduos de soja (99:1) do que no arroz (59:1). Na aveia, a PMS e TAF aumentaram linearmente com as doses de N, assim como os teores de proteína bruta (PB), fibras em detergente neutro (FDN) e ácido (FDA), e concentração e extração de N na forragem. Todos os demais parâmetros nutricionais estudados decresceram linearmente com o aumento das doses de N e com o avanço dos ciclos de crescimento da pastagem. As EUN variaram entre 36 e 61%, EAN entre 12 e 22 kg de MS por kg de N aplicado, e EBN entre 25 e 40 kg de MS por kg de N absorvido, em função das doses de N e culturas antecessoras. A presença da soja em SIPAs

contribui de forma expressiva para a adição de N ao sistema, aumentando a produção forrageira e otimizando o uso do nitrogênio aplicado na forma de ureia até 150 kg ha⁻¹ na pastagem de inverno.

Palavras-chave: adubação nitrogenada, *Avena strigosa*, bromatologia, eficiência de uso do nitrogênio, produção de forragem

Abstract

The objective was to measure the effects of soybean–rice rotation in summer in succession with black oat under nitrogen (N) rates in winter on the residual inputs from rice and soybean, and on productive, nutritional, and N use parameters of the produced forage. Field trials were conducted in 2020 and 2021 under a randomized complete block design with split plots and four replications. The effects of preceding crops in the main plots (soybean and rice) and N rates (0, 50, 100, and 150 kg ha⁻¹) in the subplots were evaluated on soybean and rice crop residues and on the forage produced by black oat. In the residues, dry matter production (DMP), N content, N input, and carbon:nitrogen (C:N) ratio were evaluated. In the forage, across three growth cycles (C1, C2, and C3), DMP, forage accumulation rate (FAR), nutritional value, N content and extraction, as well as nitrogen use efficiency (NUE), agronomic efficiency (AE), and biological efficiency (BE) of N were evaluated. Rice provided greater residue input (1,766 kg ha⁻¹) than soybean (1,656 kg ha⁻¹); however, it had lower N content (0.54%) than soybean (0.79%), resulting in greater N input from soybean (13 kg ha⁻¹) than from rice (9 kg ha⁻¹), as well as a lower C:N ratio in soybean residues (99:1) compared to rice (59:1). In oat, DMP and FAR increased linearly with N rates, as did crude protein (CP), neutral detergent fiber (NDF) and acid detergent fiber (ADF) contents, and N concentration and extraction in the forage. All other nutritional parameters studied decreased linearly with increasing N rates and with the advancement of pasture growth cycles. NUE ranged from 36 to 61%, AE from 12 to 22 kg of DM per kg of applied N, and BE from 25 to 40 kg of DM per kg of absorbed N, depending on N rates and preceding crops. The presence of soybean in ICLS contributes significantly to N addition to the system, increasing forage production and optimizing the use of nitrogen applied as urea up to 150 kg ha⁻¹ in winter pasture.

Keywords: nitrogen fertilization, *Avena strigosa*, bromatology, nitrogen use efficiency, forage production

1 Introdução

O aumento da população mundial e da demanda por alimentos associadas à necessidade de aumento da eficiência produtiva dos sistemas agropecuários, sustentabilidade e preservação dos ecossistemas ambientais fazem parte dos desafios das pesquisas agropecuárias mundiais (Cao et al., 2025; Fu et al., 2025; Eisa et al., 2025; Elkhalfi et al., 2025; Xiong e Lian, 2026).

Neste cenário a América do Sul destaca-se pelo seu potencial produtivo de alimentos e pela diversidade de condições edafoclimáticas e ecossistemas sob exploração agropecuária. Destes, destaca-se o Bioma Pampa, detentor de elevada biodiversidade vegetal e animal (Ricard et al., 2020; Jaurena et al., 2021) e que por estar sob exploração agropecuária possui papel socioambiental relevante para sua região de inserção, o Sul da América do Sul.

Devido ao papel socioambiental do Bioma Pampa, o mesmo requer estudos que contemplem estratégias que conciliem produção e conservação ambiental (Baeza et al., 2022; Milagre et al., 2025). Por estar sob exploração agropecuária, com presença de lavouras de grãos e ruminantes e herbívoros, estudos contemplando estratégias que integram essas explorações são promissores por permitirem otimizar os recursos disponíveis. Destas estratégias, os sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) são os que mais se aproximam da realidade agroambiental do Bioma Pampa tornando factíveis os ajustes produtivos por parte dos agentes ambientais exploradores desta região.

SIPAs destacam-se por otimizar as relações solo-planta-animal promovendo um sinergismo positivo para todos os atores do microecossistema. A reciclagem de nutrientes com melhoria da fertilidade e estrutura do solo permitem maior crescimento das plantas, com maior oferta de forragem e ganho animal, permitindo conciliar produtividade e sustentabilidade ambiental (Pereyra-Goday et al., 2022; Cerecetto et al., 2024).

A presença do fator animal no microecossistema requer produção forrageira, obtida por pastagens que também viabilizam cobertura vegetal e diversificação de culturas (Batista et al., 2026; Possamai et al., 2022). Estas podem ser usadas estrategicamente em vazios forrageiros (Souza et al., 2025) aportando ao sistema biomassa de forragem de elevado valor nutricional e (Blanco-Canqui e Ruis, 2020; Fontana et al., 2024; Hahn et al., 2024). Como a produção de biomassa vegetal de pastagens e seu valor forrageiro é dependente de nutrientes, dos quais destaca-se o nitrogênio (Berger et al., 2020; Ardeni et al., 2022; Mahmoud et al., 2022; Zhuang et al., 2022), otimizar o uso racional deste nutriente em SIPAs também consiste em uma estratégia para a exploração sustentável do Bioma Pampa.

Não temos conhecimento de pesquisa científicas publicadas que tenham contemplado estudos sobre uso eficiente do nitrogênio em SIPAs conduzidos em terras baixas do Bioma

Pampa manejadas sob plantio direto. Assim, objetivou-se por meio deste estudo mensurar os efeitos de um SIPA com rotação soja-arroz no verão em sucessão com a aveia preta sob doses de nitrogênio no inverno nos aportes residuais do arroz e soja, e parâmetros produtivos, nutricionais e de uso do N na forragem produzida.

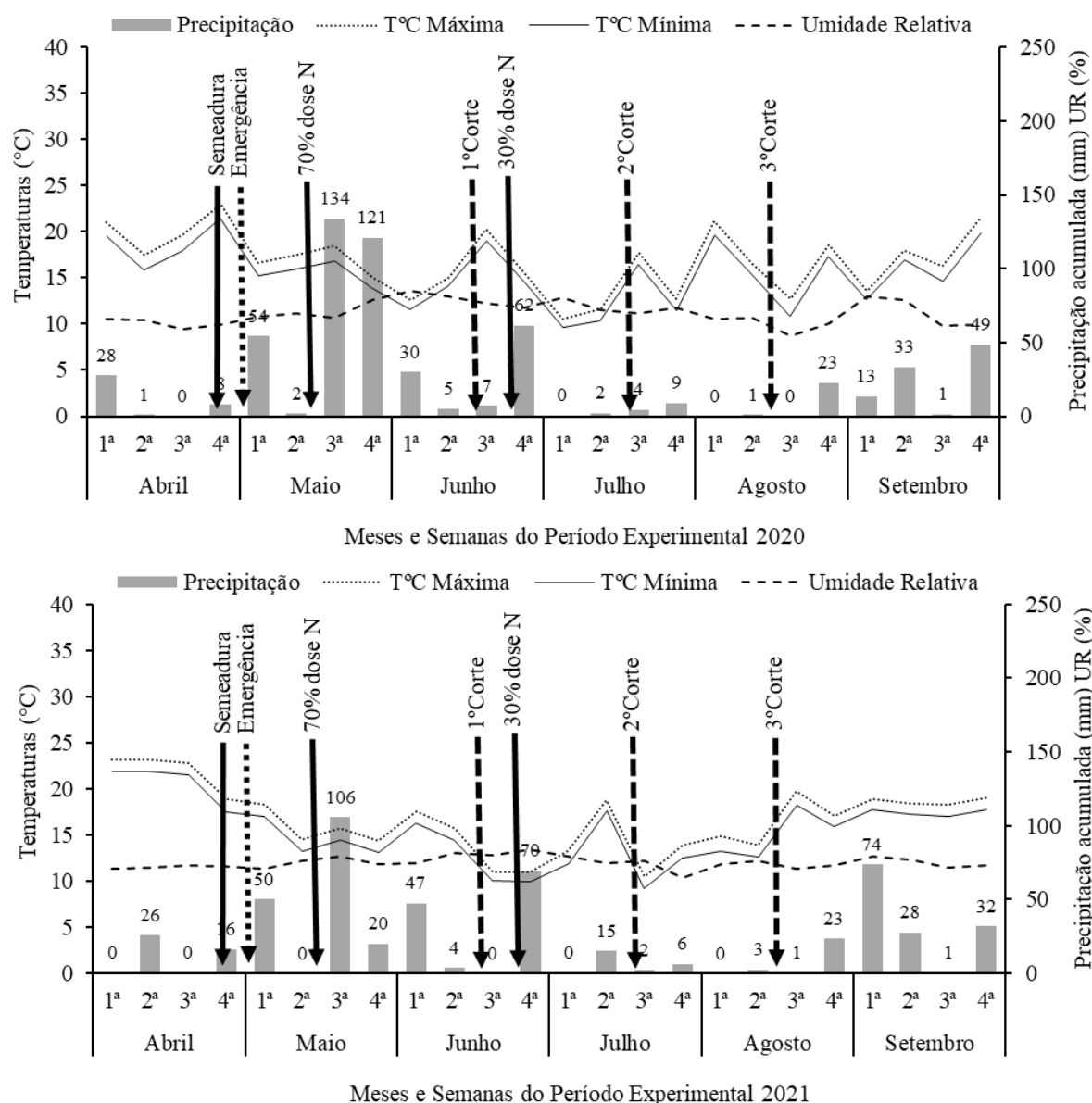
2 Material e Métodos

2.1 Descrição do local do experimento

O ensaio experimental foi conduzido em área situada na estação experimental do Instituto Riograndense do Arroz, unidade de Uruguaiana, RS, Brasil (29°50'44.6"S 57°05'11.6"W) nos anos de 2020 e 2021.

Antes do início do experimento, a área que possui solo caracterizado como Chernossolo Ebânico (Santos et al., 2025) foi amostrada para análise química e o solo apresentou as seguintes características: P (Mehlich extractor) 1.4 mg dm⁻³; MO 2 %; pH (H₂O) 5,7 mol L⁻¹; H + Al = 4.15 cmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 0.0 cmol_c dm⁻³; K = 0.23 mg dm⁻³; Ca²⁺ = 15.12 cmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 24.9 cmol_c dm⁻³; CTC = 21.4 cmol_c dm⁻³; Al = 0%; K = 0.37%; Mg/K = 74.6; Ca/Mg = 2.45; Ca/K = 185 (23% areia, 50% silte e 27% argila). Nos manejos culturais, estava submetida à sucessão anual das culturas de verão (soja e arroz) e entre os meses de abril e setembro, o cultivo de azevém para pastejo de bovinos de corte.

No período experimental entre os meses de abril e setembro em 2020 obteve-se uma média de precipitação pluviométrica mensal de 48 mm e temperatura média mensal de 16 °C. Já no ano de 2021 entre os mesmos meses a média de precipitação pluviométrica mensal foi de 176 mm e temperatura média mensal de 16 °C (Figura 1).



Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 1. Dados climáticos durante os meses de abril a setembro, nos anos de 2020 e 2021, na Estação Experimental do Instituto Riograndense do Arroz, durante avaliações de pastagens de Aveia Preta semeada após lavoura de arroz ou soja e sob doses de nitrogênio, em Uruguaiiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

2.2 Delineamento experimental e preparo da área

Foi adotado delineamento experimental blocos casualizados, com parcelas subdivididas. Nas parcelas foram alocadas as restevas das culturas soja ou arroz, enquanto nas subparcelas foram alocadas as doses de nitrogênio (0, 50, 100, 150 kg ha⁻¹) com adoção de quatro repetições.

Como adubação de base utilizou-se 200 kg ha⁻¹ do formulado 05-30-15 (N: P₂O₅: K₂O) e 100 kg ha⁻¹ de cloreto de potássio (00-00-60), baseada na análise de solo e nas recomendações

para as culturas (CQFS-RS/SC, 2016). A semeadura da aveia preta foi realizada com semeadora tratorizada de fluxo contínuo, em linhas espaçadas de 0,17 m e contemplou uma densidade de sementes de 80 kg ha⁻¹. Para fertilização de cobertura foi utilizado ureia (46% de N) aplicada à lanço no estágio vegetativo do terceiro trifólio (V₃).

Em 2020, a semeadura dos materiais de inverno foi realizada em 23 de abril, com emergência 12 dias após a semeadura. A primeira aplicação de ureia foi realizada 22 dias após a semeadura e a segunda 60 dias após a semeadura.

Em 2021 a semeadura foi realizada em 30 de abril, com emergência nove dias após a semeadura. A primeira aplicação de ureia ocorreu 27 dias após a semeadura e a segunda, 66 dias após a semeadura.

Neste estudo foram simulados com máquina de corte costal, três ciclos de pastejo, aos quais foram determinados altura de entrada para pastejo de 30 cm para aveia e 25 cm para o azevém., quando as culturas atingiam a altura esperada, era realizado o corte. Em 2020 os três cortes ocorreram 60, 102 e 138 dias após a semeadura, enquanto em 2021 foram 65, 100 e 135 dias após a semeadura.

2. 3 Amostragem e análises laboratoriais

Na determinação da produção de palhada nas áreas de cultivo de soja e arroz, antes da implantação dos cereais de inverno realizou-se amostragem de todos os resíduos culturais existentes na superfície do solo utilizando-se unidade amostral com área de 0,25 m². Adotou-se 30 pontos amostrais em cada resteva (soja e arroz). As amostras foram coletadas, acondicionadas em sacos de papel, secadas em estufa com circulação forçada de ar a 55°C e pesadas para estimativa da produção de matéria seca de palhada residual. Posteriormente foram trituradas em moinho tipo Willey com facas e câmara de inox e peneira de 1 mm e submetidas a procedimentos laboratoriais para determinação do nitrogênio e carbono total. O Nitrogênio foi obtido por digestão sulfúrica e destilação no método semi-micro Kjeldal (AOAC, 1995). O carbono foi determinado segundo o método descrito por Goldin (1987), com incineração das amostras em mufla para obtenção da matéria orgânica e posterior divisão dos valores obtidos pelo fator de 2,00 conforme proposto por Pribyl (2010) que considera que a matéria orgânica possui 50% de carbono orgânico total.

Posteriormente foram realizadas coletas de biomassa das plantas de aveia e azevém em três ciclos de crescimento dos materiais em cada unidade experimental, para a estimativa da produção de matéria seca e posteriores análises laboratoriais.

Cada amostragem compreendeu 0,75 m linear coletados em três diferentes pontos, escolhidos ao acaso, na área útil de cada unidade experimental. Após a coleta as amostras foram embaladas em sacos de papel identificados e submetidas à secagem em estufa com circulação forçada de ar sob temperatura de 55°C, até atingirem peso constante. Finalizada a secagem foram pesadas em balança analítica de precisão com posterior transformação da massa seca para kg/ha.

Em todas as coletas, as amostras de aveia e azevém pós secagem foram trituradas em moinho tipo Willey, com facas e câmara de inox, em peneira de um milímetro para determinação do valor nutricional de toda forragem disponível. Nesta, foram estimados valores de proteína bruta (PB) (AOAC, 1995), fibra em detergente neutro (FDN) (Van Soest et al., 1991) e fibra em detergente ácido (FDA) (Van Soest, 1994). A porcentagem de nutrientes digestíveis totais da forragem (%NDT) foi obtida pela equação $\%NDT = 87,84 - (0,70 \times \%FDA)$ proposta por Bolsen (1996). O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV) foi estimado pela equação $1200/FDN$, proposta por Mertens (1994). A DIGMS (% digestibilidade estimada da MS) foi obtida pela equação $DMS = 88,9 - (0,779 \times FDA)$ (BOLSEN, 1996). O valor relativo da forragem (VRF) foi obtido pelo estimador $VRF = (DIGMS \times CMSPV) / 1,29$, conforme Bolsen (1996).

2.4 Índices de Eficiência de uso do Nitrogênio

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN) foi estimada como a fração aparente de recuperação do N (Bastidas et al., 2024). Esta foi calculada como a diferença entre a absorção de N no tratamento fertilizado e no tratamento controle de cada parcela, dividida pela dose de N aplicada. O valor foi expresso como porcentagem do N aplicado, utilizando a seguinte fórmula:

$$(2) \text{ EUN (\%)} = [(NT_{CN} - NT_{SN}) / DN] \times 100$$

Onde:

- NT_{CN} é o N absorvido no tratamento fertilizado (kg/ha);
- NT_{SN} é o N absorvido no tratamento sem fertilização (controle) (kg/ha);
- DN é a dose de nitrogênio aplicada no tratamento fertilizado (kg/ha).

A eficiência agronômica do nitrogênio (EAN) equivale à produção de massa seca (MS) obtida por unidade de nutriente aplicado, é expressa em kg de MS / kg N aplicado e pode ser calculada pela seguinte equação (Fageria, 1998):

$$(3) \text{ EAN} = MS_{CN} - MS_{SN} / DN$$

Onde:

- MS_{CN} é a MS de forragem produzida no tratamento fertilizado (kg/ha);
- MS_{SN} é a MS de forragem produzida no tratamento sem fertilização (controle) (kg/ha);
- DN é a dose de nitrogênio aplicada no tratamento fertilizado (kg/ha).

A eficiência fisiológica é a produção biológica obtida por unidade de nutriente acumulado expressa em kg de MS/kg de N absorvido. É também chamada de eficiência biológica e pode ser calculada pela seguinte equação (Fageria, 1998):

$$(4) \text{EFN} = MS_{CN} - MS_{SN} / NT_{CN} - NT_{SN}$$

- NT_{CN} é o N absorvido no tratamento fertilizado (kg/ha);
- NT_{SN} é o N absorvido no tratamento sem fertilização (controle) (kg/ha);

2.5 Análise estatística

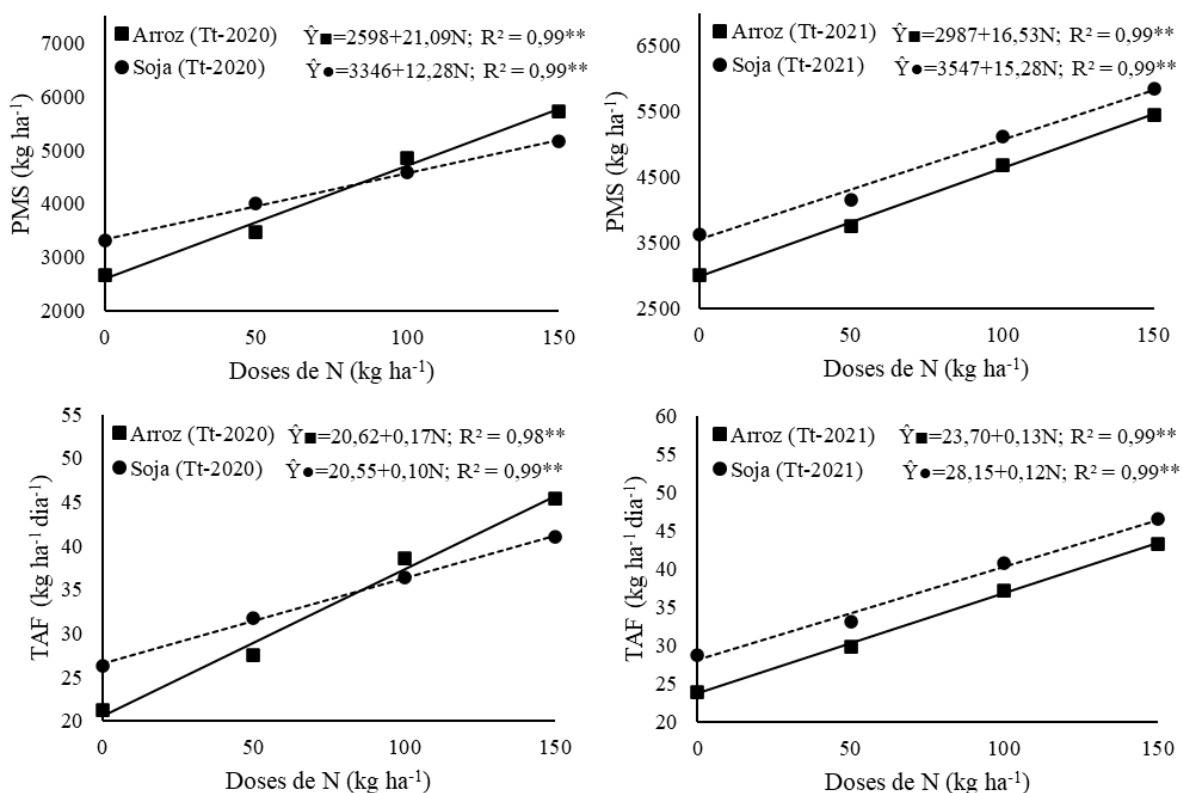
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância com confundimento suprimindo a interação tripla e com comparação de médias pelo teste Tukey usando variância complexa. As doses de N foram comparadas por meio de análise de regressão, testando-se os modelos linear e quadrático. Para escolha do modelo que melhor explicasse o comportamento dos dados considerou-se a significância dos coeficientes (Teste T de Student ao nível de 5%) e o coeficiente de determinação (R^2).

3 Resultados

A soja produziu menos resíduos culturais ($p < 0,01$) em 2020 (1743 kg ha⁻¹) e 2021 (1568 kg ha⁻¹) em contraste com o arroz nos mesmos anos (2020-1821 e 2021-1711 kg ha⁻¹). A concentração de nitrogênio (N) nas palhadas não variou entre os anos ($p > 0,05$), mas foi inferior na palhada de arroz (0,54%) em relação à soja (0,79%). No aporte nitrogenado pelas palhadas, houve efeito das culturas e dos anos avaliados ($p < 0,01$). Em 2020 e 2021 o arroz aportou 9,72 e 9,19 kg de N ha⁻¹, enquanto os aportes da soja foram de 13,78 e 12,37 kg de N ha⁻¹, respectivamente. Na relação carbono: nitrogênio (C:N) também houve significância dos anos e culturas ($p < 0,01$), onde os resíduos culturais do arroz continham relação C:N de 102 e 95 em 2020 e 2021, enquanto nos resíduos a soja os valores foram de 60 e 58, respectivamente.

Nas produções de matéria seca (PMS) e taxas de acúmulo de forragem (TAF) houve efeito das doses e das culturas antecessoras ($p < 0,01$). Na aveia preta crescendo após arroz ou soja em 2020 e 2021 houve resposta linear positiva da PMS e TAF às doses de N (Figura 2). Em 2020, para cada kg de N aplicado a aveia preta aumentou a PMS e TAF em 21,09 e 0,17 kg

ha⁻¹ quando semeada após o arroz, e 12,28 e 0,10 kg ha⁻¹, respectivamente. Os incrementos mais expressivos de PMS e TAF da aveia preta semeada após o arroz fizeram com o as PMS e TAF fossem superiores no arroz após a dose de N de 100 kg ha⁻¹ (Figura 2).



**Significativo pelo teste T de Student (1%). Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 2. Produtividade de matéria seca (PMS - kg ha⁻¹) e taxa de acúmulo de forragem (TAF - kg ha⁻¹ dia⁻¹) em pastagens de Aveia Preta, cultivadas em sucessão ao arroz ou soja, fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, realizados de abril a setembro nos anos de 2020 e 2021, Uruguiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

Em 2021, em todas as doses e N aplicadas a PMS e TAF da aveia preta semeada após a soja foram superiores à aveia preta semeada após arroz ($p < 0,01$). As respostas à cada kg de N aplicado foram semelhantes na aveia preta semeada após o arroz ou soja, com aumentos na PMS de 16,53 e 15,28 kg ha⁻¹ e na TAF de 0,13 e 0,12 kg ha⁻¹, respectivamente (Figura 2).

Na ausência da aplicação do N em cobertura, a PMS da aveia preta semeada após a soja (3314 kg ha⁻¹) foi 24% superior ao semeado após o arroz (2674 kg ha⁻¹) em 2020, enquanto em 2021, a semeadura da aveia preta após a soja permitiu PMS (3629 kg ha⁻¹) 20% superior à semeadura após arroz (3014 kg ha⁻¹). Os mesmos percentuais de aumento foram observados nas TAF (Figura 2).

Os aumentos na PMS a cada 50 kg de N ha⁻¹ aplicados aumentaram até a dose de N de 100 kg ha⁻¹ com posterior redução (Figura 2). Em 2020, a aplicação de N em apenas 50 kg ha⁻¹ aumentou as PMS em 30 e 21% na aveia preta após arroz e soja, respectivamente, em comparação à ausência e aplicação de N. No mesmo ano, ao aumentar a dose de N de 50 para 100 kg ha⁻¹, os aumentos na PMS foram de 40 e 15%, e a aplicação de N de 150 kg ha⁻¹ aumentou a PMS em apenas 18 e 13% na aveia preta após arroz e soja, respectivamente. Em 2021, respostas semelhantes foram observadas, com os maiores percentuais de aumento até a dose de N de 100 kg ha⁻¹. No primeiro intervalo de N avaliado (0-50 kg ha⁻¹) os percentuais de aumento foram de 24 e 15 na aveia preta após arroz e soja. O aumento da dose de N de 50 para 100 kg ha⁻¹ elevou a PMS da aveia preta em 25% (após arroz) e 23% (após soja), enquanto o acréscimo de N em mais 50 kg ha⁻¹ (dose de N de 150 kg ha⁻¹) proporcionou aumentos na PMS da aveia preta de apenas 16% (após arroz) e 14% (após soja) (Figura 2).

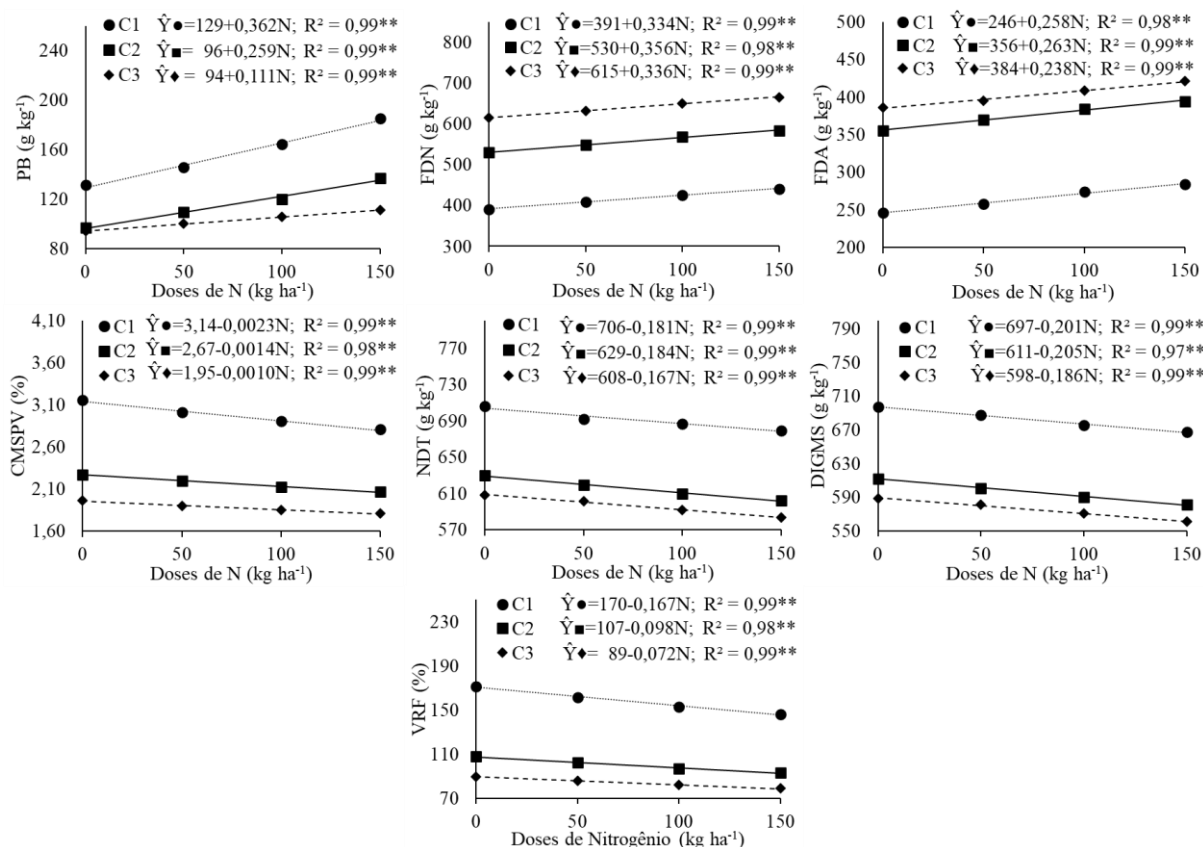
A proteína bruta (PB) respondeu de forma linear positiva às doses de N e negativamente ao avanço dos ciclos avaliativos da forragem (C1, C2 e C3) (Figura 3). No primeiro (C1), segundo (C2) e terceiro (C3) ciclos de crescimento da forragem, cada kg de N aplicado elevou a PB em 0,362; 0,259 e 0,111 g kg⁻¹ na MS, respectivamente. Entretanto, as taxas e aumento de PB tornaram-se menos expressivas com o avanço do aumento das doses de N. As reduções com o avanço dos ciclos foram mais expressivas do C1 para o C2, com redução média de 32% na PB em todas as doses de N aplicadas.

Nas fibras em detergente neutro (FDN) e ácido (FDA) houve aumento linear com as dose de N e também aumento com o avanço dos ciclos (Figura 3). Cada kg de N aplicado em cobertura elevou em média o FDN e FDA da forragem em 0,342 e 0,253 g kg⁻¹ da MS, respectivamente. Já os aumentos em função dos ciclos da forragem foram mais expressivos do C1 para o C2, com aumento de 34% no teor de FDN e 42% na FDA da forragem produzida pela aveia preta.

Nos demais parâmetros nutricionais constatou-se redução linear em resposta às doses de N, bem como reduções em função dos ciclos de crescimento da forragem (Figura 3). O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV) foi reduzido em 0,0016% do PV para cada kg de N aplicado, com redução de 27% no potencial de consumo da forragem do C1 para o C2. No NDT a redução média dos ciclos forrageiros com as doses de N foi de 0,177 g kg⁻¹ de MS para cada kg de N aplicado, enquanto, em resposta aos ciclos, a redução mais expressiva também foi do C1 para o C2 (11%).

A digestibilidade da matéria seca (DIGMS) foi 13% inferior na forragem crescendo no segundo ciclo de crescimento da aveia preta (C2) em comparação o primeiro ciclo (C1). A

aplicação das doses de N reduziu em $0,197 \text{ g kg}^{-1}$ a DIGMS para cada kg de N aplicado. No valor relativo da forragem (VRF), a forragem que cresceu no C2 foi 37% inferior à que cresceu no C1, enquanto as doses de N reduziram o VRF em $0,112\%$ para cada kg de N aplicado (figura 3).



**Significativo pelo teste T de Student (1%). PB: proteína bruta, FDN: fibra em detergente neutro, FDA: fibra em detergente ácido, CMSPV: consumo de matéria seca em percentual do peso vivo, NDT, nutrientes digestíveis totais, DIGMS: digestibilidade da matéria seca, VRF: valor relativo da forragem. Fonte: elaborado pelos autores.

Figura 3. Valor nutricional da forragem em pastagens de Aveia Preta fertilizadas com doses de nitrogênio, em três ciclos de crescimento forrageiro (C1, C2 e C3), avaliados de abril a setembro nos anos de 2020 e 2021, Uruguiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil.

Dos efeitos na concentração de N (%N) na matéria seca (MS) da forragem produzida pela aveia preta destacam-se os efeitos da cultura antecessora e das doses de N em 2020 ($p < 0,01$) e 2021 ($p < 0,05$) (Tabela 1). Em 2020, observou-se diferenças apenas na %N na dose de N de 150 kg ha^{-1} , onde a %N na forragem produzida pela aveia semeada após o arroz foi inferior (2,23%) à %N na forragem produzida após a soja (2,55%). Porém, em 2021, a superioridade da %N na forragem produzida após a soja foi observada em todas as doses de N aplicadas. Nas respostas lineares às doses de N, cada kg de N aplicado elevou a %N em 0,0034 e 0,055 em 2020; e 0,0031 e 0,0041 em 2021, na forragem após arroz e soja, respectivamente (Tabela 1).

Tabela 1. Concentração e extração de nitrogênio na forragem, eficiência de uso do nitrogênio (EUN), eficiência agrônômica do nitrogênio (EAN) e eficiência biológica do nitrogênio (EBN) em pastagens de Aveia Preta, cultivadas em sucessão ao arroz ou soja, e fertilizadas com doses de nitrogênio, em três cortes, de abril a setembro de 2020 e 2021, Uruguaiana, Rio Grande do Sul, Bioma Pampa, Brasil

Item	Ano	Antecessora	Doses de N (kg ha ⁻¹)			
			0	50	100	150
Concentração de N (%)	2020	Arroz ¹	1,72a	1,93a	2,12a	2,23b
		Soja ²	1,71a	1,86a	2,10a	2,55a
	<i>p-Value: 0,000</i>					
	2021	Arroz ³	1,73a	1,88b	2,02b	2,20b
		Soja ⁴	1,75a	1,98a	2,18a	2,37a
	<i>p-Value: 0,029</i>					
Extração de N (kg ha ⁻¹)	2020	Arroz ⁵	46b	67b	103a	128a
		Soja ⁶	57a	74a	96b	132a
	<i>p-Value: 0,000</i>					
	2021	Arroz ⁷	52b	70b	94b	120b
		Soja ⁸	64a	82a	112a	139a
	<i>p-Value: 0,000</i>					
EUN (%)	2020	Arroz	-	50aA	61aA	54aA
		Soja	-	36bA	40bA	50aA
	<i>p-Value: 0,010</i>					
	2021	Arroz	-	45bA	42bA	45bA
		Soja	-	58aA	56aA	57aA
	<i>p-Value: 0,001</i>					
EAN (kg MS kg N aplicado ⁻¹)	2020	Arroz	-	16aB	22aA	20aA
		Soja	-	14bA	13bA	12bA
	<i>p-Value: 0,000</i>					
	2021	Arroz	-	15bA	17bA	16aA
		Soja	-	21aA	19aA	18aA
	<i>p-Value: 0,021</i>					
EBN (kg MS kg N acumulado ⁻¹)	2020	Arroz	-	33bA	37aA	37aA
		Soja	-	39aA	32aA	25bB
	<i>p-Value: 0,000</i>					
	2021	Arroz	-	35aA	40aA	37aA
		Soja	-	36aA	35aA	32aA
	<i>p-Value: 0,338</i>					

Médias seguidas de diferentes letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha diferem pelo teste Tukey (5%).

P-Value: significância pelo teste F de Fisher (5%) para a interação dos fatores estudados.

¹ $\hat{Y}=1,74+0,0034N$, $R^2=0,98^{**}$; ² $\hat{Y}=1,64+0,0055N$, $R^2=0,94^{**}$; ³ $\hat{Y}=1,72+0,0031N$, $R^2=0,99^{**}$;

⁴ $\hat{Y}=1,76+0,0041N$, $R^2=0,99^{**}$; ⁵ $\hat{Y}=43+0,56N$, $R^2=0,99^{**}$; ⁶ $\hat{Y}=52+0,49N$, $R^2=0,97^{**}$; ⁷ $\hat{Y}=50+0,46N$, $R^2=0,99^{**}$;

⁸ $\hat{Y}=61+0,51N$, $R^2=0,99^{**}$. Fonte: elaborado pelos autores.

A extração de N na MS da forragem (ENF) foi alterada pelas doses de N e cultura antecessora em 2020 ($p<0,01$) e 2021 ($p<0,01$) (Tabela 1). Em 2020 e 2021, na ausência da aplicação de N em cobertura, a ENF foi 23% superior na forragem produzida após a soja em

relação à forragem produzida após o arroz. Entretanto, na dose de N de 50 kg ha⁻¹, a ENF após a soja foi menos expressiva, com apenas 10 e 17% de aumento em 2020 e 2021, respectivamente, e sem consistência nas demais doses.

Ao serem analisados os aumentos na ENF quando comparadas a dose aplicada e a dose anterior, considerando as médias de 2020 e 2021, na aveia preta após o arroz, a ENF aumentou em 19, 30 e 26 kg de N ha⁻¹ nas doses de N de 50, 100 e 150 kg ha⁻¹. Após a soja, os aumentos foram de 18, 26 e 31 kg de N ha⁻¹, respectivamente, revelando que os máximos incrementos na ENF foram obtidas com as doses de N de 100 kg ha⁻¹ na aveia preta após o arroz e 150 kg ha⁻¹ após a soja (Tabela 1). Nas respostas lineares às doses de N, os aumentos na ENF em 2020 foram de 0,56 e 0,49; e em 2021 0,46 e 0,51 na aveia preta após arroz ou soja, respectivamente.

A eficiência de uso do N (EUN) expressa em percentual (%) teve efeito das culturas antecessoras ($p < 0,01$) em 2020 e 2021. As EUN foram superiores na aveia preta após o arroz em 2020 apenas nas doses de N 50 e 100 kg ha⁻¹, enquanto em 2021 na aveia preta após a soja as EUN foram superiores em todas as doses (Tabela 1). Não houve diferença entre as doses nos dois anos e culturas antecessoras avaliados.

Na eficiência agronômica do N (EAN) expressa em kg de MS para cada kg de N aplicado, houve significância de cultura antecessora e doses de N em 2020 e apenas da cultura antecessora em 2021 (Tabela 1). Em 2020, EAN foi superior na forragem da aveia branca semeada após o arroz em todas as doses de N, e estas, quando comparadas, revelaram EAN superior nas doses de N de 100 e 150 kg ha⁻¹ aplicadas na aveia preta após o arroz (22 e 20 kg, respectivamente), sem diferenças nas doses aplicadas na aveia semeada após a soja. Em 2021, a EAN foi superior na forragem após a soja e sob doses de N de 50 e 100 kg ha⁻¹ (21 e 19 kg, respectivamente), sem diferenças entre arroz (16 kg) e soja (18 kg) na dose de N 150 kg ha⁻¹. Neste ano também não foram detectadas diferenças na EAN entre as doses de N aplicadas na aveia preta semeada após arroz ou soja (Tabela 1).

E eficiência biológica do N (EBN) que é expressa em kg de MS por kg de N absorvido na biomassa vegetal da cultura não teve efeito de doses ou culturas antecessoras em 2021 ($p > 0,05$). Entretanto, em 2020 a EBN foi semelhante entre as doses aplicadas na pastagem após arroz, mas inferior (25 kg) na dose de N 150 kg ha⁻¹ aplicada na aveia branca após a soja em comparação à mesma dose aplicada na pastagem após arroz (37 kg). Comparando as culturas antecessoras, observamos menores EUA na aveia preta após arroz (33 kg) com N de 50 kg ha⁻¹, e na aveia preta após soja (25 kg) com N de 150 kg ha⁻¹.

4 Discussão

O maior aporte de resíduos culturais na superfície do solo (kg ha^{-1}) pela lavoura de arroz em 2020 (1821) e 2021 (1711) deve-se às diferenças biológicas das culturas. Por se tratar de uma leguminosa, a soja possui maior concentração de N nos seus tecidos, o que usa energia para utilização do N e reduz a energia destinada ao acúmulo de matéria seca (MS). Porém, mesmo com menor produção de resíduos culturais em 2020 (1743) e 2021 (1568) a soja aportou mais N devido à maior concentração de N na sua palhada (0,79%).

Os maiores aportes de N (kg N ha^{-1}) pela soja em 2020 (13,78) e 2021 (12,37) associados com a maior relação C:N (60 e 58:1 em 2020 e 2021, respectivamente) contribuíram para maiores produções de MS (PMS) e taxas de acúmulo de forragem (TAF). A biologia do microecossistema proporcionado pelo cultivo da soja permitiu PMS 24% (2020) e 20% (2021) superiores ao cultivo do arroz na ausência de adubação nitrogenada em cobertura. Esses aumentos podem ser justificados pela maior disponibilização do N nas condições ambientais da aveia preta semeada após a lavoura de soja.

Além da menor relação C:N, por meio da fixação biológica do N, a cultura da soja modifica a dinâmica do N no solo, aumentando sua disponibilidade para as plantas (Kumar e Sindhu 2026). Essa disponibilidade é resultado da mineralização do N, processo pelo qual as moléculas orgânicas contidas nos resíduos culturais e matéria orgânica do solo (MOS) são degradada pelas enzimas proteolíticas secretadas pelos microrganismos do solo. Como resultado da proteólise o N é liberado na forma de peptídeos, aminoácidos e outras formas assimiláveis por microrganismos e plantas (Gilmour et al., 2020; Gan et al., 2022; Kasmerchak et al., 2025; Kumar e Sindhu 2026). Quando há aporte adequado de N no solo, os microrganismos no solo não absorvem todo o N liberado, viabilizando a absorção pelas plantas. No entanto, quando o N é utilizado pelos microrganismos, ocorre o processo de imobilização, no qual o N e também o C mineralizados são usados para criar suas proteínas e outras moléculas orgânicas dentro das células dos microrganismos, e não poderão ser utilizado pelas plantas (Wang et al., 2024; Kumar e Sindhu, 2026).

A relação C:N obtida nos resíduos da soja, embora acima da faixa ótima recomendada para a mineralização líquida do N, que é de 25:1 a 30:1 (Grzyb et al., 2020) foi suficiente para contribuir com as maiores PMS e TAF na ausência e dose de 50 kg N ha^{-1} em cobertura em 2020, e em todas as doses estudadas em 2021 (Figura 2). Nas condições deste estudo, a adubação de semeadura foi padronizada para todas as fontes de variação nos dois anos, e forneceu N em 10 kg ha^{-1} . Como o N da semeadura foi padronizado, as diferenças de solo foram isoladas pelo delineamento em blocos e as condições ambientais foram as mesmas para todos

os tratamentos em cada ano, pode-se afirmar que as diferenças na PMS e TAF na ausência da aplicação de N em cobertura devem-se aos benefícios da soja, que incluem menor relação C:N e fixação biológica do N.

Além dos efeitos benéficos do N adicionado oriundo da soja, destacam-se também os efeitos das doses. Os aumentos na PMS e TAF com as doses justificam-se pelo papel nutricional que o N desempenha no metabolismo das plantas. Após a absorção do N é usado na formação de aminoácidos, enzimas e proteínas que atuam no crescimento e divisão celular (Romann et al., 2023), resultando em plantas com maior teor de clorofila nas folhas (Yang et al., 2022), maior área foliar (Yue et al., 2022) e taxas mais altas de respiração (Bonelli e Andrade, 2020). Unidas, essas características permitem maior absorção da radiação luminosa, sua conversão em energia e geração de ATP (Verdenal et al., 2021), maior assimilação de CO₂ (Bonelli e Andrade, 2020) e maior eficiência fotossintética (Wang et al., 2024), resultando em maior acúmulo de MS.

Embora a soja tenha promovido efeitos positivos na PMS e TAF, os mesmos efeitos não foram observados no valor nutricional da forragem, que respondeu somente às doses de N. Os aumentos da proteína bruta (PB) em resposta às doses confirmam os benefícios do N adicionado ao sistema que ocasionam nas plantas aumento da concentração de aminoácidos e da síntese proteica no metabolismo vegetal (Delevatti et al., 2019). Entretanto os aumentos da FDN e FDA observados neste estudo em resposta às doses de N e avanço dos ciclos de avaliação da forragem não são nutricionalmente desejáveis. Por se tratarem de frações da parede celular das plantas, presentes em todas as células vegetais, possuem em sua composição celulose, hemicelulose e lignina (Bossoni et al., 2025). Enquanto a celulose e hemicelulose são carboidratos estruturais (Bossoni et al., 2025) de digestão lenta (Battiston et al., 2020) a lignina é um composto fenólico indigestível. Assim, seu aumento em forragens é ocasionado pelo direcionamento do carbono fotossintético para a estrutura vegetal, o que resulta em redução do valor nutritivo da forragem (Battiston et al., 2020).

Sob doses de N, como a planta aumenta sua área foliar (Yue et al., 2022) e acúmulo de MS (Wang et al., 2024), buscando interceptação luminosa, aumenta também o alongamento de colmos (Delevatti et al., 2019). Para sustentação das plantas mais pesadas, passa a direcionar mais C para as células com funções estruturais, ou seja, as contidas nos colmos. Estes tornam-se mais lignificados e com maior teor de carboidratos estruturais, e o seu alongamento resulta em maior participação de colmos na forragem em detrimento às folhas, culminando com a obtenção de forragem de menor valor nutricional. Além do alongamento dos colmos para a interceptação luminosa devido ao maior crescimento das plantas, aportes de N também retardam a entrada de culturas anuais na fase reprodutiva (Zhang et al., 2022). Esse

prolongamento do ciclo vegetativo também estimula o crescimento e resulta em maior alongamento de colmos na forragem, com efeitos negativos no valor nutricional.

O aumento dos constituintes da parede celular das plantas colhidas na forragem da aveia preta e mensurados por meio do FDN e FDA também elevaram-se no decorrer dos cortes (Figura 3). Esse aumento deve-se ao ciclo fenológico das plantas anuais possui duas fases principais, a vegetativa e reprodutiva. Na fase vegetativa há intensa produção de folhas, enquanto na fase reprodutiva o meristema apical inicia sua diferenciação não mais em células foliares, mas sim em inflorescência. Essa transição das plantas da fase vegetativa para a fase reprodutiva tem impacto significativo no valor nutricional devido ao cessamento da emissão de folhas e intenso alongamento de colmos com a entrada na fase reprodutiva. Neste estudo, embora a adubação nitrogenada possa prolongar a fase vegetativa (Zhang et al., 2022), não foi efetiva em impedir a perda de valor nutricional com o avanço dos ciclos de crescimento da aveia preta.

O consumo de matéria seca em percentual do peso vivo (CMSPV), nutrientes digestíveis totais (NDT), digestibilidade da matéria seca (DIGMS) e valor relativo da forragem (VRF) foram reduzidos com as doses de N e ciclos da forragem (Figura 3) devido ao aumento nos constituintes da parede celular das plantas (FDN e FDA). Embora a PB exerça papel positivo no CMSPV (Oliveira et al., 2017) devido ao aumento da proteína degradável no rúmen, que favorece a atividade microbiana e melhora a DIGMS (Cardoso et al., 2014), neste estudo não foi suficiente para compensar os efeitos negativos da FDN e FDA no CMSPV. Este parâmetro nutricional é afetado diretamente pela FDN, que devido aos seus constituintes (Bossoni et al., 2025), quando presente em teores acima de 550-600 g kg⁻¹ na MS da forragem (Mertens et al., 1994), resulta em menor taxa de digestão e maior tempo de retenção ruminal, resultando no chamado efeito de enchimento (Mertens et al., 1996). Esse efeito físico promove sensação de saciedade nos animais, reduzindo a ingestão voluntária de matéria seca (Oliveira et al., 2017). Assim, quanto maior o teor de FDN da forragem, menor tende a ser o CMSPV, o que pode comprometer o desempenho animal (Detmann et al., 2014).

Entretanto, apesar das reduções no CMSPV, em todas as forragens produzidas os teores foram superiores a 1,8%, revelando que com ajustes da categoria animal, as pastagens produzidas poderiam ser utilizadas como única fonte alimentar em ruminantes. Este ajuste é necessário, pois a necessidade de CMSPV varia segundo o estado fisiológico dos animais. Vacas leiteiras em lactação apresentam maiores exigências nutricionais e maior capacidade de consumo (3,5%) quando comparadas a bovinos em manutenção (2,0%) (Cardoso et al., 2014).

O NDT estima a proporção dos nutrientes presentes na forragem que são digestíveis e portanto, assimiláveis no metabolismo animal. Portanto, sua mensuração em alimentos para animais revela um índice nutricional relevante (Neumann et al, 2024). Embora tenham ocorrido reduções no NDT com o aumento das doses de N e avanço dos ciclos da forrageira (Figura 3), em todas as avaliações o NDT se manteve acima de $590 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$, confirmando a obtenção de forragens com significativo potencial nutricional.

A DIGMS é um dos principais indicadores do valor nutricional de forragens pois revela a fração do alimento ingerido que é efetivamente digerida e metabolizada pelo animal (De Macêdo Carvalho et al., 2021). Assim, também afeta diretamente o CMSPV por definir o tempo de retenção do alimento no rúmen (Oliveira et al., 2017) e a sensação de saciedade e efeito de enchimento no animal. Valores de DIGMS entre 660 e $680 \text{ g kg}^{-1} \text{ MS}$ permitem máximos CMSPV (Cardoso et al., 2014), e neste estudo foram obtidos em todas as forragens do primeiro ciclo de crescimento da aveia preta (Figura 3).

O VRF considera outros parâmetros nutricionais (CMSPV e DIGMS) e consiste num valor numérico único (Ward, 2008) indicador de qualidade de forragens sob pastejo ou conservadas. Os VRF deste estudo mantiveram-se acima de 80% em todas as avaliações e atingiram valores superiores a 150% no primeiro ciclo de crescimento da aveia. Estes resultados confirmam o potencial alimentar dessa forragem para ruminantes, pois valores superiores a 100% refletem maior conteúdo de carboidratos não fibrosos, rapidamente fermentáveis no rúmen (Brandstetter et al., 2019). VRF inferiores a 80%, que indicam predominância de carboidratos fibrosos, de digestão lenta, ou até indigestíveis, como a lignina (Gayer et al., 2019; Du et al. 2020) não foram observadas nas forragens produzidas em nenhuma das avaliações deste estudo (Figura 3).

As concentrações de N (%N) na forragem obtidas em 2020 e 2021, assim como as maiores extrações de N na forragem (ENF) após a soja em 2021 em todas as doses, e em 2020 nas doses de N 0 e 50 kg ha^{-1} confirmam os benefícios do sistema produtivo estudado na disponibilização de N para a aveia preta. Mesmo sem N em cobertura, a %N na forragem foi similar na forragem após arroz e soja, enquanto a ENF foi superior PMS da aveia preta após a soja (Tabela 1). Sob condições adequadas de N as plantas mantêm a %N constante no seu tecido vegetal, pelo efeito de diluição ajustado na sua fisiologia com o aumento da fixação de CO_2 (Bonelli e Andrade, 2020) e acúmulo de MS (Figura 2). Assim, as respostas lineares positivas das ENF às doses de N (Figura 3) devem-se à maior PMS (Figura 2). Porém, embora ocorreu aumento linear nas ENF com as doses de N, estes tornaram-se menos expressivos a cada

incremento de N de 50 kg ha⁻¹ nas doses, adequando-se à Lei dos Rendimentos Decrescentes (Mitscherlich, 1909).

Destacam-se os resultados deste estudo, onde nas doses de N de 50 e 100 kg ha⁻¹, as extrações de N na MS da forragem foram próximas ou superiores às quantidades de N aplicadas, e superiores na MS da forragem após soja (Tabela 1). Estes resultados confirmam os benefícios da introdução da soja em SIPAs e amparam-se nos maiores aportes de N proporcionados pelas palhadas de soja em 2020 (13,78 kg ha⁻¹) e 2021 (12,37 kg ha⁻¹) e conhecimentos científicos já reportados na literatura. Nestes, Denardin et al. (2025) trabalhado em SIPAs com plantio direto, como no nosso estudo, constatou que a soja aumentou a eficiência microbiana na estabilização de resíduos vegetais, com maior teor de N na biomassa microbiana do solo. Otto et al. (2024) ressalta o potencial de aporte de N pela soja em sistemas produtivos devido à fixação biológica, enquanto Dias et al (2025) enfatiza a relevância destes benefícios para a maior sustentabilidade e resiliência aos sistemas produtivos. Assim, além do N aportado pelos resíduos culturais da soja, o N extraído na MS da forragem pode ter sido originado da fixação biológica e da mineralização da MOS (Ladha et al., 2022). Mesmo na ausência da aplicação de N em cobertura, as ENF foram superiores na pastagem após a soja porque mesmo em condições de baixa disponibilidade de N no solo, as plantas aumentam o N nos exsudatos radiculares para fornecer N aos microrganismos do solo e aumentar as taxas decomposição da MOS e mineralização do N (Fan et al., 2022; Zhou et al., 2022).

A eficiência de uso do nitrogênio (EUN) é um importante indicador agrônomo da eficiência dos fertilizantes nitrogenados (Wen et al., 2026; Bastidas et al., 2024) e revela o percentual de N aplicado que foi acumulado na MS das plantas (Bastidas et al., 2024). Neste estudo, em todas as avaliações a EUN foi superior a 36% (Tabela 1), superando o valor de 30% citado com referência para EUN normalmente obtida em sistemas agrícolas (Kumar e Sindhu 2026). O comportamento inverso de redução na EUN em 2020 e aumento da EUN em 2021 como resposta às doses de N aplicadas (Tabela 1) evidencia os benefícios dos SIPAs estudados no seu segundo ano de implantação. Destes, destacam-se o fornecimento de N para as culturas a partir de múltiplas fontes (palhada, adubação mineral e matéria orgânica do solo), maior atividade microbiana e melhor sincronização entre mineralização e absorção pelas plantas (Denardin et al., 2020).

Na eficiência agrônoma do N (EAN), que corresponde a produção adicional de MS obtida por unidade de N aplicado (Fageria, 1998), as diferenças nos resultados de 2020 e 2021 pode ser justificadas pelos fatores que afetam a disponibilidade de N no solo e seu aproveitamento pelas plantas. Destes, destacam-se o tipo de matéria orgânica, características

do solo, atividade microbiana, condições ambientais, estágio fenológico de desenvolvimento da cultura (Weiler et al., 2022, Dias et al., 2025, Kumar e Sindhu, 2026).

Ainda, para essa variável destacam-se os baixos valores (12 à 22 kg de MS kg N aplicado⁻¹) (Tabela 1), que neste estudo, que visou avaliar a SIPAs não traduzem um resultado negativo. Como a estimativa da EAN considera dentre outros indicadores, a PMS obtida na ausência da aplicação de adubação, poucos kg adicionais de MS a cada kg de N aplicado revelam um resultado positivo do sistema. Ou seja, as dinâmicas de nutrientes em SIPAs com alternância de soja e arroz no verão e aveia preta no inverno permitem elevadas PMS que amortizam os efeitos do N mineral em cobertura. Entretanto, baixas EAN não obrigatoriamente significam perdas do N aplicado, pois por se tratar de um sistema dinâmico, com cobertura permanente do solo obtida pelo plantio direto, o N mineral aplicado que não foi convertido em MS de forragem possivelmente está retido no ecossistema do solo. Assim, o N aportado nas pastagens de inverno pode ser ciclado e disponibilizado à cultura subsequente implantada em sucessão (Denardin et al., 2025).

As baixas EAN justificam-se em SIPAs com soja e plantio direto devido à menor relação C:N e maior aporte de N pelos resíduos culturais da soja (Denardin et al., 2025), aumento da ciclagem de nutrientes (Farias et al., 2020; Koudahe et al., 2022) e deposição de resíduos culturais na superfície do solo (Siqueira et al., 2025). Geng et al. (2024) constataram que em condições favoráveis, o N obtido por meio da mineralização da palhada de soja pode corresponder a mais de 50% do N inorgânico absorvido durante o crescimento das culturas (Geng et al., 2024). Ainda, além dos fatores citados, o aporte de N adicional por meio da fixação biológica de N pelas plantas de soja contribui para a existência de mais uma fonte de N no sistema, tornando-o menos dependente do N proveniente do fertilizante (Denardin et al., 2025).

Embora tenham sido observados resultados positivos na ausência da adubação nitrogenada em cobertura na pastagem de inverno, a fertilização nitrogenada em SIPAs é relevante não apenas pelo fornecimento de N mineral mas também, pelo efeito *priming* desencadeado no sistema. O N mineral adicionado atua diretamente como atuar indiretamente como catalisador biológico, aumentando a atividade microbiana (Geisseler et al., 2017) e a disponibilidade do N anteriormente imobilizado temporariamente (Denardin et al., 2025).

A produção biológica obtida por unidade de N acumulado na planta, denominada de eficiência biológica do N (EBN) foi menor (25 kg MS kg de N acumulado⁻¹) justamente na combinação experimental que proporcionou maior teor de N na MS de forragem (2,55%). Esse resultado justifica-se pela fisiologia vegetal das plantas, onde em condições de maior absorção

de N, para fixação do mesmo na forma de aminoácidos e proteínas, a planta direciona o carbono fixado para a redução do N ao invés de utilizá-lo para o acúmulo de MS (Zayed et al., 2023).

Embora tenha ocorrido essa redução, em todas as demais avaliações a EBN se manteve acima de 32 kg MS kg de N acumulado⁻¹ e os valores de EBN foram superiores aos de EAN (Tabela 1). As EBN obtidas confirmam a eficiência das plantas no acúmulo de MS de forragem a partir do N absorvido.

Como considerações finais deste estudo podemos pontuar duas afirmações importantes com base nos resultados até aqui apresentados e discutidos. SIPAs com a introdução de soja são sustentáveis no uso do N independente da utilização ou não de adubação nitrogenada na pastagem de inverno. Essa afirmação, além de sustentar-se nos resultados obtidos, fundamenta-se em conhecimentos técnicos. No solo, a disponibilização do N ocorre a partir de três fontes principais, que são a decomposição da MOS, a fixação biológica do N e a adubação nitrogenada mineral (Ladha et al., 2022). Neste estudo, mesmo na ausência do N mineral os resultados foram promissores.

A eficiência com que o N é absorvido e assimilado depende da integração entre absorção radicular, metabolismo fotossintético e translocação de nutrientes ao longo do ciclo das culturas (Li et al., 2024; Sun et al., 2024). A alternância entre soja e arroz como lavouras de verão, sucedidos por aveia preta no inverno, independente do N em cobertura, permite a formação de um ambiente produtivo resiliente. Este pode ser potencializado pelos aportes de N mineral via adubações, pois estes promovem aumentos no teor de N do solo (Wen et al., 2020; Li et al., 2023) e alterações na decomposição da MOS ao longo dos anos (Li et al., 2017; Hui et al., 2022).

5 Conclusões

Em sistemas integrados de produção agropecuária (SIPAs) com alternância entre arroz ou soja no verão, o arroz aporta mais resíduos culturais, enquanto na soja estes apresentam maior N na MS (79%), maior aporte de N ao sistema (13 kg ha⁻¹) e menor relação carbono: nitrogênio (59:1).

Doses de N até 150 kg ha⁻¹ na aveia preta em SIPAs com plantio direto alternando soja e arroz aumentam a produção de forragem, sem benefícios ao seu valor nutricional.

SIPAs com alternância de soja ou arroz no verão e aveia preta sob doses de N no inverno permitem elevadas EUN (superiores a 36%) e baixa EAN (15 kg MS kg N aplicado⁻¹) na matéria seca da forragem devido ao efeito priming da introdução da soja ao sistema.

Os sistemas integrados de produção agropecuária SIPAs apresentam-se como uma alternativa promissora para aumentar a produção de forragem e eficiência de uso do nitrogênio (NUE) na aveia preta.

6 Referências Bibliográficas

ARDENTI, F.; ABALOS, D.; CAPRA, F.; LOMMI, M.; MARIS, S.C.; PEREGO, A.; BERTORA, C.; TABAGLIO, V.; FIORINI, A. Matching crop row and dripline distance in subsurface drip irrigation increases yield and mitigates N₂O emissions. **Field Crops Research**, v. 289, n.1, 108732, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108732>.

BAEZA, S.; VÉLEZ-MARTIN, E.; DE ABELLEYRA, D.; BANCHERO, S.; GALLEGO, F.; SCHIRMBECK, J.; VERON, S.; VALLEJOS, M.; WEBER, E.; OYARZABAL, M.; BARBIERI, A.; PETEK, M.; GUERRA, M. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: the MapBiomass Pampa initiative. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.28, n. 1, 100834, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>.

BASTIDAS, M.; VÁZQUEZ, E.; VILLEGAS, D.M.; RAO, I.M.; GUTIERREZ, J.F.; VIVAS-QUILA, N.J.; AMADO, M.; BERDUGO, C.; ARANGO, J. Optimizing nitrogen use efficiency of six forage grasses to reduce nitrogen loss from intensification of tropical pastures. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 367, n. 3, 108970, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108970>

BATISTA, Y.; MACHADO, D.L.; CORREIA, M.E.F.; SPINELLI, M.H.M.; CORÁ, J.E. Soil macrofauna correlations with soil chemical and physical properties and crop sequences under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, n.1, e0230006, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230006>.

BATTISTON, J., HENRIQUE, D. S., MAYER, L. R. R., KÖLLN, R. S., FLUCK, A. C., OLIVEIRA, J. G.; SCHNEIDER, A.E.; FIORELLI, A. B.; FERNANDES, R.A. A. Composição química e cinética de degradação ruminal in vitro de aveia branca cv. URS guapa sob diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, 72, n. 2, 581-589. 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4162-11131>.

BERGER, K.; VERRELST, J.; FÉRET, J. B.; WANG, Z.; WOCHER, M.; STRATHMANN, M.; DANNER, M.; MAUSER, W.; HANK, T. Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. **Remote Sensing of Environment**, v. 242, n.1, p. 111758, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S.J. Cover crop impacts on soil physical properties: a review. **Soil Science Society of American Journal**, v.84, n.5, 1527-1576, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>.

BOLSEN, K.K. **Silage technology**. In: AUSTRALIAN MAIZE CONFERENCE, 2., 1996, Queensland. Anais... Queensland: Gatton College, p.1-30.1996.

BONELLI, L.E., ANDRADE, F.H., Maize radiation use-efficiency response to optimally distributed foliar-nitrogen-content depends on canopy leaf-area index. **Field Crops Research**, v. 247, n. 2, 107557, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107557>.

BOSSONI, G.E.B.; ALMEIDA, A.M.; CONSTANTIN, R.P.; MARCIOSI, R.; FERRARESE-FILHO, O.; SAGE, R.F.; SANTOS, W.D. Assessing the cell wall nitrogen use efficiency – Can the differences between cell wall architectures contribute to the nitrogen economy of plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 229, n. 12, 110548, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110548>.

BRANDSTETTER, E. V.; PINHO COSTA, K.A.; SANTOS, D.C.; SOUZA, W.F.; COSTA E SILVA, V.; CASTRO DIAS, M.B. Protein and carbohydrate fractionation of Jiggs Bermudagrass in different seasons and under intermittent grazing by Holstein cows. **Acta Scientiarum - Animal Sciences**, v. 41, n. 1, p. 1–7, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v41i1.43363>.

CAO, T.; XIE, N.; HANIM, W.; QIN, Y. Digital-green synergistic transition, fiscal decentralization and regional green total factor productivity in agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 385, n. 6, 125382, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125382>.

CARDOSO E.S.; SANTANA JUNIOR, H.A.; SANTANA, E.O.C.; FERREIRA, A.H.C.; MACIEL, M.S.; OLIVEIRA, Z.F.; FIGUEIREDO, C.B.; BRITO, J.M. Reguladores de consumo de bovinos em pastagem: recentes avanços. **Revista eletrônica Nutritime**. v. 11, n. 5, p. 3672-3682. 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nutriti.me.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Artigo-271.pdf

CERECETTO, V.; LEONI, C.; JURBURG, S.D.; KAMPOURIS, I.D.; SMALLA, K., BABIN, D. Pasture-crop rotations modulate the soil and rhizosphere microbiota and preserve soil structure supporting oat cultivation in the Pampa biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 195, n. 10, 109451, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109451>.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11. ed. Porto Alegre; Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Núcleo Regional Sul. UFRGS, 2016.

DELEVATTI, L. M.; CARDOSO, A.S.; BARBERO, R.P.; LEITE, R.G.; ROMANZINI, E.P.; RUGGIERI, A.C.; REIS, R.A. Effect of nitrogen application rate on yield, forage quality, and animal performance in a tropical pasture. **Scientific Reports**, v.9, n.1, p.1-9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44138-x>.

DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; CARMONA, F.C.; VELOSO, M.G.; CARMONA, G.I.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I. Integrated crop–livestock systems in paddy fields: New strategies for flooded rice nutrition. **Agronomy Journal**, v. 112, n.3, p.2219–2229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20148>.

DENARDIN, L.G.D.O.; ALVES, L.A.; MARTINS, A.P.; FLORES, J.P.M.; BRAWERS, L.P.; FILIPPI, D.; CAMARGO, F.A.D.O. Enhancing nitrogen use efficiency in paddy fields: the role

of livestock integration and rice-soybean rotation. **Field Crops Research**, v. 333, n.1, 110059, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110059>.

DETMANN, E.; GIONBELLI, M. P.; HUHTANEN, P. A meta-analytical evaluation of the regulation of voluntary intake in cattle fed tropical forage-based diets. **Journal of Animal Science**, v. 92, n.10, p. 4632-4641, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7717>.

DIAS, V.O.; RIBAS, G.G.; SOUZA, M.E.A.; SANTANA, D.M.; RAPHAEL, J.P.A.; KHATOUNIAN, C.A.; FAVARIN, J.L. Plant residue quality indices for selecting summer cover crops in tropical environments. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 49, n. 1, e014325, 2025. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1413-7054202549014325>

DU, Z.; RISU, N.; GENTU, G.; JIA, Y.; CAI, Y. Dynamic changes and characterization of the protein and carbohydrate fractions of native grass grown in Inner Mongolia during ensiling and the aerobic stage. **Asian-Australasian Journal of Animal Sciences**, v. 33, n. 4, p. 556–567, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5713/ajas.19.0212>.

EISA, M.; BRONDI, M.; WILLIAMS, C.; HEJL, R.; BALTRUSAITIS, J. From urea to urea cocrystals: A critical view of conventional and emerging nitrogenous fertilizer materials for improved environmental sustainability. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 9, n. 3, 100209, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100209>

ELKHALFI, O.; CHAABITA, R.; GHOUJDAM, M.; ZEHRAOUI, K.; ALAOUI, H.E.L.; BELHAJ, I. The impact of climate change on food security in the Middle East and North Africa: Challenges and adaptation strategies. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 21, n. 6, 101963, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101963>

FAGERIA, N.K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v.2, p.6-16, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v02n01p6-16>.

FAN, K.; HOLLAND-MORITZ, H.; WALSH, C.; GUO, X.; WANG, D.; BAI, Y.; ZHU, Y.-G.; FIERER, N.; CHU, H., Identification of the rhizosphere microbes that actively consume plant-derived carbon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 166, n.3, 108577, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108577>.

FARIAS, G.D., DUBEUX, J.C.B., SAVIAN, J.V., DUARTE, L.P., MARTINS, A.P., TIECHER, T., ALVES, L.A., CARVALHO, P.C.F., BREMM, C. Integrated crop-livestock system with system fertilization approach improves food production and resource-use efficiency in agricultural lands. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 40, n. 6, p. 1–9. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00643-2>.

FONTANA, M.B.; NOVELLI, L.E.; STERREN, M.A.; UHRICH, W.G.; RONDAN, G.A.; BARBAGELATA, P.A.; BENITENDE, S. M. Cover crop benefit bacteria and increase aggregate-associate soil C and N storage. **Geoderma Regional**, v. 36, n. 3, e00743, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00743>.

FU, S.; LV, T.; WU, G.; LI, H.; ZHU, L.; ZHANG, X. Discerning changes in carbon emission intensity of cultivated land utilization since agricultural green transformation: Based on the

motivation-opportunity-ability (MOA) framework. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 114, n. 6, p. 107946, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107946>

GAN, D.; ZENG, H.; ZHU, B. The rhizosphere effect on soil gross nitrogen mineralization: A meta-analysis. **Soil Ecology Letters**, v. 4, p. 144-154, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42832-021-0098-y>

GAYER, T. O. et al. Different dry matters content used for the conservation of annual ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in anaerobic environment. **African Journal of Agricultural Research**, v. 14, n. 6, p. 369–378, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5897/AJAR2018.13675>.

GEISSELER, D.; LINQUIST, B.A.; LAZICKI, P.A. Effect of fertilization on soil microorganisms in paddy rice systems-a meta-analysis. **Soil Biology and Biochemistry**, v.115, n. 12. p. 452–460, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.018>

GENG, S.; LI, L.; MIAO, Y.; ZHANG, Y.; YU, X.; ZHANG, D.; YANG, Q.; ZHANG, X.; WANG, Y. Nitrogen rhizodeposition from corn and soybean, and its contribution to the subsequent wheat crops. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 23, n. 7, p. 2446–2457, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jia.2023.11.018>.

GILMOUR, J.T. Predicting soil organic matter nitrogen mineralization. **Soil Science Society of American Journal**, v. 85, n.2, p. 353–360, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20203>

GOLDIN, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in noncalcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 18, n. 10, p.1111-1116, 1987. DOI: <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>

GRZYB, A.; WOLNA-MARUWKA, A.; NIEWIADOMSKA, A. Environmental factors affecting the mineralization of crop residues. **Agronomy**, v. 10, n. 12, 1951, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy10121951>

HAHN, L.; WAMSER, A.F.; WOLSCHICK, N.H.; GRANDO, D.L.; SIQUEIRA, G.N.; BRUNETTO, G. Garlic yield after decomposition and nutrient release of cover crops under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 48, n.1, e0230134, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230124>

HUI, K.; XI, B.; TAN, W.; SONG, Q. Long-term application of nitrogen fertilizer alters the properties of dissolved soil organic matter and increases the accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons. **Environmental Research**, v. 215, n. 12, 114267, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114267>

JAURENA, M.; DURANTE, M.; DEVINCENZI, T.; SAVIAN, J.V.; BENDERSKY, D.; MOOJEN, F.G.; PEREIRA, M.; SOCA, P.; QUADROS, F.L.F.; PIZZIO, R.; NABINGER, C.; CARVALHO P.C.F.; LATTANZI, F. Native grasslands at the core: A new paradigm of intensification for the Campos of Southern South America to increase economic and environmental sustainability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, n. 1, p. 547834, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.547834>.

KASMERCHAK, C.S. DAUGHTRIDGE, R.C. MARGENOT, A.J. Differential response of chitinolytic and proteolytic depolymerization-mineralization pathways to organic nitrogen

substrates. **Biology and Fertility of Soils**, v. 61, p. 1215-1234. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-025-01932-2>

KOUDAHE, K.; ALLEN, S.C.; DJAMAN, K.; Critical review of the impact of cover crops on soil properties. *International Soil and Water Conservation Research*, v. 10, n. 3, p. 343-354, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.03.003>.

KUMAR, S.; SINDHU, S.S. Microbiome-mediated nitrogen cycling in soil: Impact on nitrogen use efficiency, crop production and environmental sustainability, **Soil Security**, v. 22, n. 3, 100225, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soisec.2026.100225>.

LADHA, J.K.; PEOPLES, M.B.; REDDY, P.M.; BISWAS, J.C.; BENNETT, A.; JAT, M.L.; KRUPNIK, T.J. Biological nitrogen fixation and prospects for ecological intensification in cereal-based cropping systems. **Field Crops Research**, v. 283, n. 7, 108541, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108541>

LI, R.; REN, C.; WU, L.; ZHANG, X.; MAO, X.; FAN, Z. Fertilizing-induced alterations of microbial functional profiles in soil nitrogen cycling closely associate with crop yield. **Environmental Research**, v. 231, n. 10, 116194, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116194>

LI, X.G.; JIA, B.; LV, J.; MA, Q.; KUZYAKOV, Y.; LI, F.M. Nitrogen fertilization decreases the decomposition of soil organic matter and plant residues in planted soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 112, n. 9, 47–55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.018>

LI, X.; LONG, A.; JI, X.; WANG, X.; WANG, Z.; GONG, X.; ZHANG, W.; QI, H.; JIANG, Y.; SUN, Z. ZHAO, F. Straw return and nitrogen fertilizer application regulate the efficient use of radiation, water, nitrogen and maize productivity in Northeast China. **Agricultural Water Management**, v. 301, n. 10, 108973, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108973>.

MAHMOUD, R.; CASADEBAIG, P.; HILGERT, N.; ALLETTO, L.; FRESCHE, G.T.; DE MAZANCOURT, C.; GAUDIO, N. Species choice and N fertilization influence yield gains through complementarity and selection effects in cereal-legume intercrops. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 12, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00754-y>.

MERTENS, D. R. Formulating dairy rations: using fiber and carbohydrate analyses to formulate dairy rations. In: **Information conference with dairy and forage industries**. Madison: US Dairy Forage and Research Center, 1996.

MERTENS, D. R. Regulation of forage intake. In: **Forage Quality, Evaluation, and Utilization**, G. C. Fahey, Jr, M. Collins, D. R. Mertens, and L. E. Moser, ed., American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Madison, WI, 1994. p. 450–493. DOI: <https://doi.org/10.2134/1994.foragequality.c11>

MILAGRE, J.C.; MENDES, L.J.; SILVA, P.S.; SANTOS, W.R.; FOCKING, G.D.; GRANZOTO, F.; FONTANA, A.S.; SCHENATO, R.B.; ROVEDDER, A.P.M. Long-term effects of cattle rearing on vegetation and soil in riparian forests in southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.92, n.2, e20240333, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240333>.

MITSCHERLICH, E. Das gesetz des minimums und das gesetz des abnehmenden bodenertrages. **Landwirtsch Jahrb**, v. 38, n. 1, p. 537–552, 1909.

NEUMANN, M.; BALDISSERA, E.; ALESSI IENKE, L.; MARTINS DE SOUZA, A.; PIEMONTEZ DE OLIVEIRA, P.E.; HARRY BUMBIERIS JUNIOR, V. Nutritional Value Evaluation of Corn Silage from Different Mesoregions of Southern Brazil. *Agriculture*, v. 14, n. 7, p.1055, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14071055>.

OFFICIAL METHODS OF ANALYSIS. **Association of Official Analytical Chemistry**, 12 ed. Washington, D.C. 1995.

OLIVEIRA, B. C., DE OLIVEIRA, G., CAETANO, M. B., RAIMUNDO, T., & DE OLIVEIRA, C. B. Mecanismos reguladores de consumo em bovinos de corte. **Nutritime revista eletrônica**, v.14, n.4, p. 6066-6075, 2017.

OTTO, R.; BARTH, G.; VALENCIANO, M.N.; SOARES, J.R.; FRANCISCO, E.A.B.; PROCHNOW, L.I. Eight years of eco-intensification of maize-soybean rotation in south Brazil: Maize grain production and nitrogen fertilizer replacement value. **European Journal of Agronomy**, v. 159, n. 9, 127261, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127261>

PEREYRA-GODAY, F.; ROVIRA, P.; AYALA, W. RIVERO, J. Management and Productivity of Key Integrated Crop–Livestock Systems in Uruguay: The Palo a Pique Long-Term Experiment’s Third Phase. **Agronomy**, v. 12, n.12, 3023, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123023>.

POSSAMAI, E.J.; CONCEIÇÃO, P.C.; AMADORI, C.; BARTZ, M.L.C.; RALISCH, R.; VICENSI, M. MARX, E.F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, n. 10, e0210104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcS20210104>

PRIBYL, D.W. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. **Geoderma**, v.156, n.3-4, p.75-83, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.02.003>

QUATRIN, M. P.; OLIVO, C.J.; MEINERZ, G.R.; FONTANELLI, R.S.; AGUIRRE, P.F.; SEIBT, D.C.; AIRES, J.F.; FALK, D.R.; SAUTER, C.P.; SILVA, A.R. Produtividade de genótipos de trigo duplo propósito submetidos ao pastejo com vacas em lactação. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 69, n. 6, p. 1615-1623, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-9470>

RICARD, M.F.; BERTHONGARAY, G.; VIGLIZZO, E.F. The Argentine Pampas: A Novel Ecosystem at the Crossroad. **Encyclopedia of the World's Biomes**, v. 5. n. 1, 117-127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12060-3>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12060-3>. Acesso em: 23 dezembro 2025.

ROMMAN, M.; PARVEZ, R.; ADNAN, M.; GUL, F.; HAROON, M.; ULLAH, R.; SAUD, S.; AHMED, N.; HAMEED, I.; NAWAZ, T. Nitrogen-fixing biofertilizers, in: **Biofertilizers for Sustainable Soil Management**. CRC Press: Boca Raton, FL, USA, pp. 233–254, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003286233>

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; LIMA, H.N.; MARQUES, F.A.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 6. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 396 p.

SIQUEIRA, G.N.; TIECHER, T.L.; ALVES, L.A.; TASSINARI, A.; GRANDO, D.L.; DRESCHER, G.L.; BRUNETTO, G.; GOULART, R.Z.; BORDIGNON, V.; TIECHER, T. Short-term effects of winter cover crops and summer cash crops on soil properties in Ultisol under no-tillage system in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 40, n. 3, e00935, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00935>

SOUZA, D.P.; BOSI, C.; MENDONÇA, F.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; FEITOSA, T.S.; OJEDA, J.J. Structuring and parameterizing a model for simulating annual ryegrass growth. **European Journal of Agronomy**, v.170, n. 9, 127735, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127735>.

SUN, G.; CHEN, S.; ZHANG, S.; CHEN, S.; LIU, J.; HE, Q.; HU, T.; ZHANG, F. Responses of leaf nitrogen status and leaf area index to water and nitrogen application and their relationship with apple orchard productivity. **Agricultural Water Management**, v. 296, n. 3, 108810, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108810>

VAN SOEST, P. V. et al Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of dairy science**, v. 74, n. 10, p. 3583-3597, 1991. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2)

VAN SOEST, P.J. **Nutritional ecology of the ruminant**, 2nd ed. Ithaca: Cornell University press. United States of America, 476p, 1994.

VERDENAL, T.; DIENES-NAGY, Á.; SPANGENBERG, J.E.; ZUFFEREY, V.; SPRING, J.-L.; VIRET, O.; MARIN-CARBONNE, J.; VAN LEEUWEN, C. Understanding and managing nitrogen nutrition in grapevine: A review. **OENO One**, v. 55, n. 1, p. 1-43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20870/oenone.2021.55.1.3866>

WANG, Q.; LI, S.; LI, J.; HUANG, D. The utilization and roles of nitrogen in plants. **Forests**, v. 15, n. 7, p. 1191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/F15071191>

WEILER, D.A.; AITA, C.; BASTOS, L.M.; GIACOMINI, S.J. Changes in chemical composition of cover crops residue during decomposition. **Ciência Rural**, v. 52, n. 4, e20210357, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210357>.

WEN, Y.C.; LI, H.Y.; LIN, Z.A.; ZHAO, B.Q.; SUN, Z.B.; YUAN, L. Long-term fertilization alters soil properties and fungal community composition in fluvo-aquic soil of the North China Plain. **Scientific Reports**, v. 10, n. 4, 7198. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-64227-6>

WEN, K.; PENG, A.; WEI, Y.; ZHANG, M.; WU, Z.; YOU, J.W.; XU, W.; LI, X.; CHEN, Y.; MA, Y.; WEI, L.; HUANG, W.; MI, B.; XIE, L.; LIAO, D.; ZHANG, W. Pumpkin rootstock enhances nitrogen-use efficiency and low-nitrogen resilience in Benincasa hispida via coordinated nitrogen transport and phenylpropanoid metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 230, n. 1, 110848, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110848>

XIONG, X.; LIAN, H. Assessing the impact of crop–livestock integration on food security: Evidence from the Huang–Huai–Hai region of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 538, n. 1, 147395, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147395>

YANG, L., MUHAMMAD, I., CHI, Y.X., LIU, Y.X., WANG, G.Y., WANG, Y., ZHOU, X.B., 2022. Straw return and nitrogen fertilization regulate soil greenhouse gas emissions and global warming potential in dual maize cropping system. **Science of The Total Environment**, v. 853, n. 12, 158370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158370>.

YUE, K., LI, L., XIE, J., WANG, L., LIU, Y., ANWAR, S., Tillage and nitrogen supply affects maize yield by regulating photosynthetic capacity, hormonal changes and grain filling in the Loess Plateau. **Soil Tillage Research**, v. 218, n. 4, 105317, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105317>.

ZAYED, O.; HEWEDY, O.A.; ABDELMOTELEB, A.; ALI, M.; YOUSSEF, M.S.; ROUMIA, A.F.; SEYMOUR, D.; YUAN, Z.-C. Nitrogen Journey in Plants: From Uptake to Metabolism, Stress Response, and Microbe Interaction. **Biomolecules**, v. 13, n. 10, p. 1443, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/biom13101443>.

ZHANG, S.; LIU, Y.; DU, M.; SHOU, G.; WANG, Z.; XU, G. Nitrogen as a regulator for flowering time in plant. **Plant Soil**, v. 480, n.10, p. 1–29, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05608-w>

ZHOU, J.; GUILLAUME, T.; WEN, Y.; BLAGODATSKAYA, E.; SHAHBAZ, M.; ZENG, Z.; PEIXOTO, L.; ZANG, H.; KUZYAKOV, Y. Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**. 175, 108850. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108850>.

ZHOU, J.; GUILLAUME, T.; WEN, Y.; BLAGODATSKAYA, E.; SHAHBAZ, M.; ZENG, Z.; PEIXOTO, L.; ZANG, H.; KUZYAKOV, Y. Frequent carbon input primes decomposition of decadal soil organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**. 175, 108850. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108850>.

ZHUANG, Q.; WU, S.; HUANG, X.; KONG, L.; YAN, Y.; XIAO, H.; LI, Y. CAI, P. Monitoring the impacts of cultivated land quality on crop production capacity in arid regions. **Catena**, v. 214, n. 7, 106263, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106263>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816222002491>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ZOU, H.; LI, D.; REN, K.; LIU, L.; ZHANG, W.; DUAN, Y.; LU, C. Response of maize yield and nitrogen recovery efficiency to nitrogen fertilizer application in field with various soil fertility. **Frontiers in Plant Science**, v. 27, n. 15, 1349180, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1349180>.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Mediante a importância socioambiental do Bioma Pampa, este estudo nos desafiou a avaliar uma alternativa sustentável de sistema integrado de produção agropecuária (SIPA).

Neste, a alternância de culturas no verão (soja ou arroz) e o uso de doses de nitrogênio nas pastagens de inverno revelou insights promissores sobre os desafios propostos.

Os efeitos observados na presença da soja como cultura antecessora confirmam experiências anteriores em SIPAs distintos que apontavam diversos benefícios ao sistema. Destes, foram mensurados e confirmados neste estudo o aporte de N via resíduos culturais e potenciais benefícios adicionados ao solo como a fixação biológica e otimização da ação microbiana com mineralização do N para absorção pelas culturas.

A introdução das forrageiras permitiu elevada produção de forragem, que foi potencializada com a soja como cultura antecessora e com a aplicação das doses de N até 150 kg ha⁻¹.

A dinâmica do microecossistema criado, com eliminação da irrigação por inundação no arroz, adoção do sistema de plantio direto para todas as culturas, alternância de culturas no verão (soja e arroz) e uso de cereais forrageiros de inverno sob doses de N no inverno viabilizou elevada eficiência no uso do N pelas pastagens, com significativos teores e extrações do nutriente na sua MS.

Assim, é possível afirmar que o SIPA estudado revela-se com uma estratégia promissora para exploração agropecuária sustentável das terras baixas do Bioma Pampa do Brasil.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, Z.; SHEW, A.; NALLEY, L.; POPP, M.; GREEN, V.S.; BRYE, K. An examination of thematic research, development, and trends in remote sensing applied to conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 12, n. 1, p. 77-95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.04.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095633923000278>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ANDRADE, B.O.; MARCHESI, E.; BURKART, S.; SETUBAL, R.B.; LEZAMA, F.; PERELMAN, S.; SCHNEIDER, A.A.; TREVISAN, R.; OVERBECK, G.E.; BOLDRINI, I.I. 2018. Vascular plant species richness and distribution in the Río de la Plata grasslands. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 188, n. 3, 2018, p. 250–256, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boy063>. Disponível em: <https://academic.oup.com/botlinnean/advance-article/doi/10.1093/botlinnean/boy063/5125667>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ANDRADE, B.O., DRÖSE, W., AGUIAR, C.A.D., AIRES, E.T., ALVARES, D.J., BARBIERI, R.L., CARVALHO, C.J.B.D., BARTZ, M., BECKER, F.G., BENCKE, G.A., BENEDUZI, A., SILVA, J.B. et al. 12,500+ and counting: biodiversity of the Brazilian Pampa. **Frontiers of Biogeography**, v.15, n.2, e59288, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.21425/F5FBG59288>. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/7tp2k884>. Acesso em: 13 janeiro 2025.

ARDENTI, F.; ABALOS, D.; CAPRA, F.; LOMMI, M.; MARIS, S.C.; PEREGO, A.; BERTORA, C.; TABAGLIO, V.; FIORINI, A. Matching crop row and dripline distance in subsurface drip irrigation increases yield and mitigates N₂O emissions. **Field Crops Research**, v. 289, n.1, 108732, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108732>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429022003033>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ASSMANN, J.M.; MARTINS, A.P.; ANGHINONI, I.; DE OLIVEIRA DENARDIN, L.G.; DE HOLANDA NICHEL, G.; DE ANDRADE COSTA, S.E.V.G.; PEREIRA E SILVA, R.A.; BALERINI, F.; DE FACCIO CARVALHO, P.C.; FRANZLUEBBERS, A.J. Phosphorus and potassium cycling in a long-term no-till integrated soybean-beef cattle production system under different grazing intensities insubtropics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 108, n.1, p.21–33, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-016-9818-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-016-9818-6>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

AZEVEDO, E.B.; ROSA, F.; DORNELLES, R.; MALAGUEZ, E.G.; Nutritional characteristics estimated by faecal protein in cattle fed with heterogeneous natural grassland. **Animal Production Science**, v. 64, n. 2, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1071/AN22418>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/377493736_Nutritional_characteristics_estimated_by_faecal_protein_in_cattle_fed_with_heterogeneous_natural_grassland. Acesso em: 12 outubro 2025.

BAEZA, S., PARUELO, J.M., 2020. Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata grasslands: An analysis based on MODIS NDVI time series. **Remote Sensing**, v.12, n.3,

1–22, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12030381>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/3/381>. Acesso em: 18 julho 2025.

BAEZA, S.; VÉLEZ-MARTIN, E.; DE ABELLEYRA, D.; BANCHERO, S.; GALLEGU, F.; SCHIRMBECK, J.; VERON, S.; VALLEJOS, M.; WEBER, E.; OYARZABAL, M.; BARBIERI, A.; PETEK, M.; GUERRA, M. Two decades of land cover mapping in the Río de la Plata grassland region: the MapBiomass Pampa initiative. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.28, n. 1, 100834, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100834>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352938522001422?via%3Dihub>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

BAI, Y.; COTRUFO, M.F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. **Science**, v. 377, n. 6606, p. 603-608, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>. Disponível em: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abo2380>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BARDELLE, A.; GASTINEAU, R.; GUILLEVIC, F.; FOUCHER, A.; CHABOCHE, P.; CORCHO-ALVARADO, J.A.; ROLLIN, S.; CHALAR, G.; SABATIER, P.; TASSANO, M.; COTTIN, N.; VANDROMME, R.; CERDAN, O.; ALEWELL, C.; EVRARD, O. The hidden consequences of agricultural development: Soil degradation and pesticide contamination in the South American Pampa. **Science of the Total Environment**, v. 1002, n. 1, 180584, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180584>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969725022247?via%3Dihub>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

BARUSELLI, P.S.; ABREU, L.A.; MENCHACA, A.; BÓ, G.A. The future of beef production in South America. **Theriogenology**, v. 231, n. 1, p. 21-28, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2024.10.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0093691X24004060>. Acesso em: 28 setembro 2025.

BASTIDAS, M.; VAZQUEZ, E.; VILLEGAS, D.M.; RAO, I.M.; GUTIERREZ, J.F.; VIVAS-QUILA, N.J.; AMADO, M.; BERDUGO, C.; ARANGO, J. Optimizing nitrogen use efficiency of six forage grasses to reduce nitrogen loss from intensification of tropical pastures. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 367, n. 6, 108970, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108970>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167880924000884?via%3Dihub>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

BATISTA, Y.; MACHADO, D.L.; CORREIA, M.E.F.; SPINELLI, M.H.M.; CORÁ, J.E. Soil macrofauna correlations with soil chemical and physical properties and crop sequences under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, n.1, e0230006, 2023. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230006>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/9s8LM57GX8N8wXt398GT3CH/?lang=en#>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BATISTA, Y.; MACHADO, D.L.; CORREIA, M.E.F.; SPINELLI, M.H.M.; CORÁ, J.E. Crop sequence effects on the genesis of soil aggregates in no-tillage systems: A focus on biogenic structures. **Soil and Tillage Research**, v. 257, n. 3, 106981, 2026. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106981>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198725005355>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BATTISTON, J.; HENRIQUE, D.S.; MAYER, L.R.R.; KOLLN, R.S.; FLUCK, A.C.; OLIVEIRA, J.G.; SCHNEIDER, A.E.; FIORELI, A.B.; FERNANDES, R.A.A. Composição química e cinética de degradação ruminal in vitro de aveia branca cv. URS guapa sob diferentes níveis de adubação nitrogenada. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 72, n. 2, p. 581-589, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-4162-11131>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/abmvz/a/vPrBt8nmYGQfCkZnf4whkZN/?lang=pt>. Acesso em: 30 janeiro 2026.

BERGAMIN, R.S.; MOLZ, M.; ROSENFELD, M.F.; KLIPEL, J.; BIASOTTO, L.D.; JARENKOW, J.A. **Forests in the South Brazilian Grassland Region**. In: OVERBECK, G.E., PILLAR, V.D.P., MÜLLER, S.C., BENCKE, G.A. (eds) *South Brazilian Grasslands*. Springer, Cham, pp. 385–415. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42580-6_15. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-42580-6_15. Acesso em: 13 janeiro 2026.

BERGER, K.; VERRELST, J.; FÉRET, J. B.; WANG, Z.; WOCHER, M.; STRATHMANN, M.; DANNER, M.; MAUSER, W.; HANK, T. Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. **Remote Sensing of Environment**, v. 242, n.1, p. 111758, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BETANCUR-CORREDOR, B.; LANGO, B.; RUSSELL, D.J. et al. Reducing tillage intensity benefits the soil micro-and mesofauna in a global meta-analysis. **European Journal Soil Science**, v.73, n.6, e13321, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.13321>. Disponível em: <https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/ejss.13321>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BHARTI, A.; KHAJURIA, V.; SHARMA, B.C.; KUMMAR, V.; SHARMA, A. Growth and quality parameters of oat (*Avena sativa* L.) cultivars as influenced by different cutting management in irrigated subtropical conditions. **Range Management and Agroforestry**, v. 45, n. 1, p. 90-95, 2024. DOI: <https://doi.org/10.59515/rma.2024.v45.i1.12>. Disponível em: <https://publications.rmsi.in/index.php/rma/article/view/611>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S.J. Cover crop impacts on soil physical properties: a review. **Soil Science Society of American Journal**, v.84, n.5, 1527-1576, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/saj2.20129>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

BOHN, A.; BORTOLIN, G.S.; CASTELLANOS, C.I.S.; REIS, B.B.; SUNE, A.S.; BONOW, J.F.L.; PEDROSO, C.E.S.; MITTELMANN, A. Nitrogen fertilization of self-seeding Italian ryegrass: effects on plant structure, forage and seed yield. **Ciência Rural**, v. 50, n. 6, e20190510, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190510>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/vxkT3Vr3XkL9YRbWv4qp7kK/?lang=en>. Acesso em: 30 janeiro 2026.

BOLSEN, K.K. **Silage technology**. In: AUSTRALIAN MAIZE CONFERENCE, 2., 1996, Queensland. Anais... Queensland: Gatton College, p.1-30.1996.

BOSSONI, G.E.B.; ALMEIDA, A.M.; CONSTANTIN, R.P.; MARCIOSI, R.; FERRARESE-FILHO, O.; SAGE, R.F.; SANTOS, W.D. Assessing the cell wall nitrogen use efficiency – Can the differences between cell wall architectures contribute to the nitrogen economy of plants? **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 229, n. 12, 110548, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110548>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0981942825010769>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

BOUGHTON, E.H.; SONIER, G.; GOMEZ-CASANOVAS, N.; BERNACCHI, C.; DELUCIA, E.; SPARKS, J.; SWAIN, H.; ANDERSON, E.; BRINSKO, K.; GOUGH, A.M.; KUZIEL, L.W.; LANDAU, L.; LI, H.; MCMILLAN, N.A.; REYES, A.L.; RIVERO, A.; SAHA, A.; SORFLEET, J.; WEST, A.; ZAMBRANO-LEE, M. Impact of Patch-Burn Grazing on Vegetation Composition and Structure in Subtropical Humid Grasslands. **Rangeland Ecology & Management**, v. 98, n. 1, p. 588–599, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rama.2024.11.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1550742424001933>. Acesso em: 19 agosto 2025.

BOWLES, T.M.; MOOSHAMMER, M.; SOCOLAR, Y.; CALDERO, F.; CAVIGELLI, M.A.; CULMAN, S.W.; DEEN, W.; DRURY, C.F.; GARCIA, A.G.; CAUDIN, A.C.M.; HARKCOM, W.S.; LEHMAN, R.M.; OSBORNE, S.L.; ROBERTSON, G.P.; SALERNO, J.; SCHMER, M.R.; STROCK, J.; GRANDY, A.S. Long-Term Evidence Shows that Crop-Rotation Diversification Increases Agricultural Resilience to Adverse Growing Conditions in North America. **One Earth**, v. 2, n.3, 284–293, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.007>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590332220300889>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

BRAGANÇA, L.F.; UNAMUZAGA, L.V.G.; SCHNEIDER, C.R.; GARCEZ, K.F.; ZAMBOM, M.A.; MATTEI, E.; KROLOW, R.H.; NERES, M.A.; CASTAGNARA, D.D. Potencial forrageiro de milheto e sorgo na fronteira oeste do Rio Grande do Sul. **Observatório de La Economia Latinoamericana**, v. 22, n.7, 5651-e5651, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n7-059>. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5651>. Acesso em: 22 junho 2025.

BUSS, G. L.; WESZ, J.; SCIVITTARO, W.B.; CARLOS, F.S.; BAYER, C.; SOUZA, R.O. New irrigation management in paddy fields reduces methane emissions and increases water use efficiency. **Journal of Environmental Management**, v. 397, n. 1, 128273, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.128273>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301479725042495>. Acesso em: 30 janeiro 2026.

CAMPOLI, J.S. ; STIVALI, M. Social cost of deforestation in Brazilian biomes. **Journal for Nature Conservation**, v. 91, n. 1, 127189, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127189>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1617138125003668?via%3Dihub>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

CAO, T.; XIE, N.; HANIM, W.; QIN, Y. Digital-green synergistic transition, fiscal decentralization and regional green total factor productivity in agriculture. **Journal of Environmental Management**, v. 385, n. 6, 125382, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.125382>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479725013581>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CARDOSO E.S.; SANTANA JUNIOR, H.A.; SANTANA, E.O.C.; FERREIRA, A.H.C.; MACIEL, M.S.; OLIVEIRA, Z.F.; FIGUEIREDO, C.B.; BRITO, J.M. Reguladores de consumo de bovinos em pastagem: recentes avanços. **Revista eletrônica Nutritime**. v. 11, n. 5, p. 3672-3682. 2014. Disponível em: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Artigo-271.pdf. Acesso em: 23 março 2025.

CARLOS, F.S.; DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C.F.; ROSSI, I.; BUCHAIN, M.P.; CEREZA, T.; CARMONA, F.C.; CAMARGO, F.A. Integrated crop–livestock systems in lowlands increase the availability of nutrients to irrigated rice. **Land Degradation & Development**, v. 31, n.18, p. 2962–2972, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3653>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ldr.3653>. Acesso em: 15 janeiro 2025.

CARMONA, F.; DENARDIN, L.; MARTIN, A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P. C. de F. **Sistemas Integrados em Produção Agropecuária em Terras Baixas**. [S. l.: s. n.], 2018.

CARVALHO, P.C. DE F.; DA SILVEIRA PONTES, L.; BARRO, R.S.; SIMÕES, V.J.L.P.; DOMINSCHKE, R.; DOS SANTOS CARGNELUTTI, C., MAURICIO, R.M.; SÃO JOSÉ, J.F.B.; BREMM, C. Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p2309, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01057-9>. Disponível em: https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Aagd%3A4%3A6530596/detailv2?sid=ebsco%3Aplink%3Ascholar&id=ebsco%3Aagd%3A180970203&crl=c&link_origin=www.google.com. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CERECETTO, V.; LEONI, C.; JURBURG, S.D.; KAMPOURIS, I.D.; SMALLA, K., BABIN, D. Pasture-crop rotations modulate the soil and rhizosphere microbiota and preserve soil structure supporting oat cultivation in the Pampa biome. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 195, n. 10, 109451, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109451>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038071724001408?via%3Dihub>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CEZIMBRA, I. M.; NUNES, P.A.A.; SOUZA FILHO, W.; TISCHLER, M.R.; GENRO, T.C.M.; BAYER, C.; SAVIAN, J.V.; BONNET, O.J.F.; SOUSSANA, J.F.; CARVALHO, P.C.F.. Potential of grazing management to improve beef cattle production and mitigate methane emissions in native grasslands of the Pampa biome. **Science of The Total Environment**, v. 780, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146582>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969721016508?via%3Dihub>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CHEN, Z.; ZHU, Z.; ZHANG, W.; SUN, S. Subsoiling tillage increased core microbiome associated with nitrogen fixation in the fallow season under rainfed maize monoculture. **Soil**

and Tillage Research, v. 235, n. 1, 105885, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2023.105885>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198723002520>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

COELHO, L. L.; MARCHESAN, E.; OLIVEIRA, M.L.; SEERAFIN, A.D.; FLECK, A.G.; DONATO, G.; PROCHNOW, M.H.; RISTE, U.S. Ryegrass management in lowland areas on the establishment and development of soybean in succession. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 15, n. 3, p.01-09, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v15i3a7002>. Disponível em: <http://www.agraria.pro.br/ojs32/index.php/RBCA/article/view/v15i3a7002>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CONFORTIN, A.C.; ROCHA, M.G.; MACHADO, J.M.; ROMAN, J.; QUADROS, F.L.F.; POTTER, L. Diferentes massas de forragem sobre as variáveis morfogênicas e estruturais de azevém anual. **Ciência Rural**, v. 43, n. 3, p.496-502, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782013005000003>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/7dT5pcHpmBSdrskhw57QRWp/?lang=pt>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

CORTNER, O.; GARRETT, R.D.; VALENTIM, J.F.; FERREIRA, J.; NILES, M.T.; REIS, J.; GIL, J. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. **Land Use Policy**, v. 82, n. 1, p. 841–853, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.01.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0264837718306057>. Acesso em: 14 agosto 2025.

CRUZ, P.; LEZANA, L.; DURANTE, M.; JAURENA, M.; FIGARI, M.; BITTENCOURT, L.; THEAU, J.P.; MASSA, E.; QUADROS, F.L.F. A functional classification of 63 common Poaceae in the "Campos" grasslands of South America. **Ecologia Austral**, v. 29, n.2, p. 239-248, 2019. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.19.29.2.0.727>. Disponível em: https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/727/396. Acesso em: 14 agosto 2025.

DE MACÊDO CARVALHO, C. B.; MACAMBIRA, G. M.; DOS SANTOS, A. C. F.; DE HOLANDA OLIVEIRA, H. S.; DA SILVA, D. A.; RIBEIRO, A. G.; SILVA, G. D.; PESSOA, D.V.; MACIEL, M.S.; MARINHO, J.B.M.; MEDEIROS, A.S.; SOARES, G.S.C.; SALES, T.B.; SILVA, P.H.F.; FRANÇA SILVA, G.K. Métodos de análise da composição química e valor nutricional de alimentos para ruminantes. **Research, Society and Development**, v.10, n.10, p. 1-10, 2021. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i10.19047>. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/19047>. Acesso em: 22 dezembro 2024.

DENARDIN, L.G.O.; CARMONA, F.C.; VELOSO, M.V.; MARTINS, A.P.; FREITAS, T.F.; CARLOS, F.S.; MARCOLIN, E.; CAMARGO, F.A.O.; ANGHINONI, I. No-tillage increases irrigated rice yield through soil quality improvement along time. **Soil and Tillage Research**, v. 186, n. 3, p. 64-69, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.10.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198718308304>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

DENARDIN, L.G.O.; MARTINS, A.P.; CARMONA, F.C.; VELOSO, M.G.; CARMONA, G.I.; CARVALHO, P.C.F.; ANGHINONI, I. Integrated crop–livestock systems in paddy fields:

New strategies for flooded rice nutrition. **Agronomy Journal**, v. 112, n.3, p.2219–2229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20148>. Disponível em: <https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/agj2.20148>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

DENARDIN, L.G.D.O.; ALVES, L.A.; MARTINS, A.P.; FLORES, J.P.M.; BRAWERS, L.P.; FILIPPI, D.; CAMARGO, F.A.D.O. Enhancing nitrogen use efficiency in paddy fields: the role of livestock integration and rice-soybean rotation. **Field Crops Research**, v. 333, n.1, 110059, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.110059>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429025003247>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

DETMANN, E.; GIONBELLI, M. P.; HUHTANEN, P. A meta-analytical evaluation of the regulation of voluntary intake in cattle fed tropical forage-based diets. **Journal of Animal Science**, v. 92, n.10, p. 4632-4641, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2527/jas.2014-7717>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25085401/>. Acesso em: 12 agosto 2025.

EISA, M.; BRONDI, M.; WILLIAMS, C.; HEJL, R.; BALTRUSAITIS, J. From urea to urea cocrystals: A critical view of conventional and emerging nitrogenous fertilizer materials for improved environmental sustainability. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 9, n. 3, 100209, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2025.100209>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949839225000045>. Acesso em: 14 janeiro 2025.

ELKHALFI, O.; CHAABITA, R.; GHOUJDAM, M.; ZEHRAOURI, K.; ALAOUI, H. E.; BELHAJ, I. The impact of climate change on food security in the Middle East and North Africa: Challenges and adaptation strategies. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 21, n. 6, 101963, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101963>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154325003345>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

FENG, L.; WANG, Y.; FENSHOLT, R.; TONG, X.; TAGESSON, T.; ZHANG, X.; ARDO, J.; ZHOU, J.; SHAO, W.; DOU, Y.; SANG, Y.; TIAN, F. Globally increased cropland soil exposure to climate extremes in recent decades. **Nature Communications**, v. 16, n. 4, 4354, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-025-59544-1>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41467-025-59544-1#citeas>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

FONTANA, M.B.; NOVELLI, L.E.; STERREN, M.A.; UHRICH, W.G.; RONDAN, G.A.; BARBAGELATA, P.A.; BENINTENDE, S.M. Cover crop benefit bacteria and increase aggregate-associate soil C and N storage, **Geoderma Regional**, v. 36, n. 3, e00743, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00743>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352009423001396>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

FOUCHER, A.; TASSANO, M.; CHABOCHE, P.-A.; CHALAR, G.; CABRERA, M.; GONZALEZ, J.; CABRAL, P.; SIMON, A.-C.; AGELOU, M.; RAMON, R.; TIECHER, T.; EVRARD, O. Inexorable land degradation due to agriculture expansion in South American Pampa. **Nature Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 662–670, 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/s41893-023-01074-z>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41893-023-01074-z>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

FU, Y.; YANG, G.; LI, Z.; LI, H.; LI, Z.; XU, X.; SONG, X.; ZHANG, Y.; DUAN, D.; ZHAO, C.; CHEN, L. Progress of hyperspectral data processing and modelling for cereal crop nitrogen monitoring. **Computers and Electronics in Agriculture**, vol. 172, p. 105321, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105321>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168169919318253>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

FU, S.; LV, T.; WU, G.; LI, H.; ZHU, L.; ZHANG, X. Discerning changes in carbon emission intensity of cultivated land utilization since agricultural green transformation: Based on the motivation-opportunity-ability (MOA) framework. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 114, n. 7, 107946, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.107946>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019592552500143X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

FURQUIN, F.F.; MACHADO, B.F.; FURQUIN, M.D.; POTTER, L. Interaction among fire and sward height increases leaf nitrogen per unit area of annual ryegrass in subtropical grasslands from southern Brazil. **Ciência Rural**, v. 55, n. 9, e20240458, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20240458>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/wYwhZnWmXpmLgtDBQ8zdLXx/?lang=en>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

GARBISU, C.; UNAMUNZAGA, O.; ALKORTA, I. Generating regenerative agriculture. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 9, n. 2, 1545811, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1545811>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2025.1545811/full>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

GARCEZ, K.F.; SCHNEIDER, C.R.; BRAGANÇA, L.F.; FERNANDES, T.; NERES, M.A.; KROLOW, R.H.; AZEVEDO, E.B.; CASTAGNARA, D.D. Addition of corn, soybean and rice brens improve the conservation and nutritional value of Tifton 85 silages. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.6, n.2, p.1773-1790, 2023. DOI: <https://doi.org/10.34188/bjaerv6n2-066>. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/60773>. Acesso em: 15 setembro 2025.

GENTSCH, N.; RIECHERS, F.L.; BOY, J.; SCHWENEKER, D.; FEUERSTEIN, U.; HEUERMAN, D.; GUGGENBERGER, G. Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. **Soil**, v. 10, n. 1. p. 139–150, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>. Disponível em: <https://soil.copernicus.org/articles/10/139/2024/>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

GIACOMELI, R.; MARCHESAN, E.; OLIVEIRA, M.L.; MARTIN, T.; TELÓ, G.M.; DONATO, G.; SILVA, M.F. 2017. Physical properties and crop management for corn in an albaqualf. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, n. 1, p.1-14, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160237>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/DQD4D35mkW4dJtdjGQGw9dJ/?format=html&lang=en>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

GIACOMELI, R.; CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; CHECHI, L.; BEUTLER, A.N.; FULANETI, F.S.; FERRAZZA, C.M. Improving irrigation, crop, and soil management for sustainable soybean production in southern Brazilian lowlands. **Scientia Agrícola**, v. 79, n. 6,

e20210115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0115>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/bVtZX5PrxgwD8syPMbLGxMh/?format=html&lang=en>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

GOULART, R.Z.; REICHERT, J.M.; RODRIGUES, M.F. Cropping poorly-drained lowland soils: Alternatives to rice monoculture, their challenges and management strategies. **Agricultural Systems**, v. 177, n.1, 102715, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102715>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X18308060?via%3Dihub>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

GUBIANI, P.I.; MÜLLER, E.A.; SOMAVILLA, A.; ZWIRTES, A.L.; MULAZZANI, R.P.; MARCHESAN, E. Transpiration reduction factor and soybean yield in low land soil with ridge and chiseling. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 42, n. 1, p. 1-14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170282>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/DvHX35rKf3spwY75cMGRD3s/?lang=en>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

HAHN, L.; WAMSER, A.F.; WOLSCHICK, N.H.; GRANDO, D.L.; SIQUEIRA, G.N.; BRUNETTO, G. Garlic yield after decomposition and nutrient release of cover crops under no-tillage and conventional tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 48, n. 5, e0230134, 2024. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20230134>. Disponível em: <https://www.rbcsjournal.org/article/garlic-yield-after-decomposition-and-nutrient-release-of-cover-crops-under-no-tillage-and-conventional-tillage/>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

HAN, L.; LU, C.; CHEN, L.; WANG, F.; CHEN, Q.; GAO, K.; YU, Y.; XU, C. Carbon sequestration potential of biochar in soil from the perspective of organic carbon structural modification. **Applied Soil Ecology**, v. 198, n. 6, 105389, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105389>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139324001203?via%3Dihub>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

HASENACK, H.; WEBER, E.J.; BOLDRINI, I.I.; TREVISAN, R.; FLORES, C.A.; DEWES, H., Biophysical delineation of grassland ecological systems in the state of Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Iheringia, Série Botânica**, v.78, n.1, e2023001, 2023. DOI: [10.21826/2446-82312023v78e2023001](https://doi.org/10.21826/2446-82312023v78e2023001). Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/1296>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

HERCHER-PASTEUR, J.; MAZZETTO, A.; TIERI, M.P.; FAVERIN, C.; STIRLING, C.; WALLACE, D.; CIGANDA, V.; FARINA, S.; ROMERA, A. Integrated crop-ruminant livestock systems as a strategy to increase energy, carbon and nutrient circularity: Exploring scenarios in dairy production systems across the southern hemisphere. **Agricultural Systems**, v. 233, n. 3, 104616, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104616>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X25003567>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

HOU, P.; YAN, L.; PETROPOULUS, E.; WANG, J.; XUE, L.; YANG, L.; CHEN, L. Effect of fertilization on nitrogen losses through surface runoffs in Chinese farmlands: A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 793, n. 1, 108554, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148554>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969721036263>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

IBGE, 2024. **Produção Agrícola Municipal** – Culturas Temporárias e Permanentes. In: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

JAURENA, M.; DURANTE, M.; DEVINCENZI, T.; SAVIAN, J.V.; BENDERSKY, D.; MOOJEN, F.G.; PEREIRA, M.; SOCA, P.; QUADROS, F.L.F.; PIZZIO, R.; NABINGER, C.; CARVALHO P.C.F.; LATTANZI, F. Native grasslands at the core: A new paradigm of intensification for the Campos of Southern South America to increase economic and environmental sustainability. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, n. 1, p. 547834, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.547834>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/sustainable-food-systems/articles/10.3389/fsufs.2021.547834/full>. Acesso em: 02 setembro 2025.

JAYARAMAN, S.; NAOREM, A.; DALAL, R.C.; SINHA, N.K.; RAO, C.S.; LAL, R.; KUNDU, S.; PRASAD, J.V.N.S.; SINGH, A.K. Chapter Two - No-till farming and climate change mitigation: Lessons learnt from long-term no-till experiments and future perspectives. **Advances in Agronomy**, v. 187, n. 1, p. 21-107, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2024.05.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S006521132400066X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

KANG, J.H.; DING, W.H.; CHANG, N.J.; YI, X.P.; ZHANG, J.F.; LI, H. Optimized crop-livestock coupling to reduce agricultural manure-N surplus and greenhouse gas emissions in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 467, n. 3, 142835, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142835>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652624022844>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

KROB, P.M.; ZORTEA, R.B.; BOURSCHEID, M.R.C.; FERREIRA, P.M.A.; ANDRADE, B.O.; OVERBECK, G.E. The contribution of southern Brazil to the climate and biodiversity agenda: a synthesis of the Campos Sulinos. **Bio Diverso**, v.1, n.1, 132–144, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/index.php/biodiverso/article/view/120228>. Acesso em: 13 jan. 2026.

LEMAIRE, G.; GARNIER, J.; DA SILVEIRA PONTES, L.; DE FACCIO CARVALHO, P.C.; BILLEN, G.; SIMIONI ASSMANN, T. Domestic herbivores, the crucial trophic level for sustainable agriculture: avenues for reconnecting livestock to cropping systems. **Agronomy**, v. 13, n. 4, 982, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13040982>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/4/982>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

LI, X.; LONG, A.; JI, X.; WANG, X.; WANG, Z.; GONG, X.; ZHANG, W.; QI, H.; JIANG, Y.; SUN, Z. ZHAO, F. Straw return and nitrogen fertilizer application regulate the efficient use of radiation, water, nitrogen and maize productivity in Northeast China. **Agricultural Water Management**, v. 301, n. 10, 108973, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2024.108973>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377424003081>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

LIU, W.; YAN, S.; JIANG, N.; LI, M.; YIN, L.; ZHANG, S.; XIE, X.; GAO, G.; CHANG, S.; HOU, F. Interaction of nitrogen and mowing frequency in enhancing regeneration and crude protein content of forage oat in Northwestern of China. **Field Crops Research**, v. 331, n. 1, 109994, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2025.109994>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842902500259X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

LV, C.; WANG, C.; CAI, A.; ZHOU, Z. Global magnitude of rhizosphere effects on soil microbial communities and carbon cycling in natural terrestrial ecosystems. **Science of The Total Environment**, v. 856, n.1, 158961, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158961>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722060600>. Acesso em: 14 janeiro 2025.

MAGGI, G.; SCHNEIDER, C.R.; LIMA, A.D.; ROVARIS, G.B.; KROLOW, R.H.; CASTAGNARA, D.D. Quality of sorghum hybrid silages at different storage times. **South African Journal of Animal Science**, v.53, n.4, p. 560-572, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4314/sajas.v53i4.10>. Disponível em: https://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0375-15892023000400010. Acesso em: 23 maio 2025.

MAHMOUD, R.; CASADEBAIG, P.; HILGERT, N.; ALLETTO, L.; FRESCHET, G.T.; DE MAZANCOURT, C.; GAUDIO, N. Species choice and N fertilization influence yield gains through complementarity and selection effects in cereal-legume intercrops. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 42, n. 12, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00754-y>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13593-022-00754-y>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

MALAFIA, G.C.; MORAES, G.V.; CASAGRANDA, Y.G.; BARCELLOS, J.OJ; COSTA, F.P. The Brazilian beef cattle supply chain in the next decades. **Livestock Science**, v. 253, n.1 p. 104704, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104704>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1871141321003127>. Acesso em: 12 julho 2025.

MALAGUEZ, E.G.; DINARTE, G.V.; TADIELO, L.E.; DOS SANTOS, N.L.T.; CASTAGNARA, D.D. Alternatives for spring forage emptiness in Pampa, Brazil. **Revista De Agricultura Neotropical**, v.4, n.4, 58-64, 2017. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v4i4.1590>. Disponível em: <https://periodicosonline.uems.br/index.php/agrineo/article/view/1590>. Acesso em: 10 janeiro 2025.

MAPBIOMAS. **RAD2024**: Relatório Anual do Desmatamento no Brasil 2024 - São Paulo, Brasil - MapBiomas, 2025 - 209 páginas DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5193>. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ac5193>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

MARAFON, G.; BARBOSA, R.S.; LACERDA, J.J.J.; MARTINS, V.; SILVA, J.D.F.; COSTA JR., Z.S. C and P pool restoration by a no-tillage system on Brazilian Cerrado Oxisol in Piauí State. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 1, 254, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8221-6>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-8221-6>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

MEROTTO, A.; GAZZIERO, D.L.P.; FIGUERO, R.; TURRAA, G.M. Herbicide use history and perspective in South America. **Advances in Weed Science**, v. 40, n. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:seventy-five010>. Disponível em: <http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.scielo.br/j/aws/a/rcXZpvbdKL7cJL7SHF8NZxt/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

MERTENS, D. R. Analysis of fiber in feeds and its use in feed evaluation and ration formulation. **Simpósio Internacional de Ruminantes**, v. 1, p. 01-32, 1992.

MERTENS, D. R. Formulating dairy rations: using fiber and carbohydrate analyses to formulate dairy rations. In: **Information conference with dairy and forage industries**. Madison: US Dairy Forage and Research Center, 1996.

MERTENS, D.R. Creating a system for meeting the fiber requirements of dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 80, n.7, p.1463-1481, 1997. DOI: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76075-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76075-2). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030297760752>. Acesso em: 15 dezembro 2025.

MICHEL, T.; NABINGER, C.; OVERBECK, E.G. Estimating costs of ecological restoration across degradation scenarios in South Brazilian grasslands. **Restoration Ecology**, e70283, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1111/rec.70283>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/rec.70283>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

MILAGRE, J.C.; MENDES, L.J.; SILVA, P.S.; SANTOS, W.R.; FOCKING, G.D.; GRANZOTO, F.; FONTANA, A.S.; SCHENATO, R.B.; ROVEDDER, A.P.M. Long-term effects of cattle rearing on vegetation and soil in riparian forests in southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.92, n.2, e20240333, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1590/0001-3765202520240333>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/3tbDF6Vrqfq9Vj5ydbTvGC/?format=html&lang=en>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

MODERNE, P.; DOGLIOTTI, S.; ALVAREZ, S.; CORBEELS, M.; PICASSO, V.; TITTONELL, P.; ROSSING, W.A.H. Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. **Ecological Indicators**, v. 89, n.1, p.755–770, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.038>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1470160X18300360>. Acesso em: 16 agosto 2025

MONDAL, S.; CHAKRABORTY, D. Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. **Geoderma**, v. 405, n. 1, 115443, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0016706121005231>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

MORAES, A., CARVALHO, P.C., CRUSCIOL, A.C., LANG, C.R., PARIZ, C.M., DEISS, L.; SULK, R.M. Integrated crop-livestock systems as a solution facing the destruction of pampa and cerrado biomes in South America by intensive monoculture systems. **Agroecosystem Diversity: Reconciling Contemporary Agriculture and Environmental Quality**, p. 257-273, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00016-9>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128110508000169>. Acesso em: 28 dezembro 2024.

MOREIRA, A.; BREMM, C.; FONTANA, D. C.; KUPLICH, T. M. Seasonal dynamics of vegetation indices as a criterion for grouping grassland typologies. **Scientia Agricola**, v. 76, p. 24-32, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0173>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sa/a/Sxz4ZCYNWFQLgSLwKPRJ79M/?lang=en>. Acesso em: 14 setembro 2025.

NASCIMENTO, P. M. L.; FARJALLA, B.; NASCIMENTO, J.L.; Consumo voluntário de bovinos. **RedVet**, v. 10, n. 10, 2009. Disponível em: http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/24-consumo.pdf. Acesso em: 12 setembro 2025.

NUNES, A.V.; PERES, C.A.; CONSTANTINO, P.A.L.; SANTOS, B.A.; FISCHER, E. Irreplaceable socioeconomic value of wild meat extraction to local food security in rural Amazonia. **Biological Conservation**, v. 236, n. 1, p.171–179, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.05.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0006320719300370>. Acesso em: 12 outubro 2025.

OJEDA, J.J.; CAVIGLIA, O.P.; AGNUSDEI, M.G.; ERRECART, P.M.; Forage yield, water- and solar radiation-productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina. **Field Crops Research**, v. 221, n. 15, p. 19-31, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429017316957>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

OLIVEIRA, B. C., DE OLIVEIRA, G., CAETANO, M. B., RAIMUNDO, T., & DE OLIVEIRA, C. B. Mecanismos reguladores de consumo em bovinos de corte. **Nutritime revista eletrônica**, v.14, n.4, p. 6066-6075, 2017. Disponível em: <http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nutritime.com.br/wp-content/uploads/2020/02/Artigo-433.pdf>. Acesso em: 02 outubro 2025.

OLIVEIRA, D.M.S.; SANTOS, R.S.; CHIZZOTTI, F.H.M.; BRETAS, I.L.; FRANCO, A.L.C.; LIMA, R.P.; FREITAS, D.A.F.; CHERUBIN, M.R.; CERRI, C.E.P. Crop, livestock, and forestry integration to reconcile soil health, food production, and climate change mitigation in the Brazilian Cerrado: A review. **Geoderma Regional**, v. 37, n. 6, e00796, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2024.e00796>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352009424000439>. Acesso em: 14 janeiro 2024.

OLLE, F.A.; FERREIRA, O.G.L.; PEDROSO, C.E.S.; FARIAS, P.P.; AZEVEDO, G.M.; VAZ, R.Z. Potencial da fertilização nitrogenada em pastagem natural diferida em mitigar o vazio forrageiro outonal. **Revista Em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 17, n. 4, e12388, 2024. DOI: <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2024v17n4e12388>. Disponível em: <https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/12388>. Acesso em: 28 julho 2025.

OLOGUNDE, O.H.; BELLO, S.K.; BUSARI, M.A.; Integrated agricultural system: a dynamic concept for improving soil quality. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.23, n. 5, p.352-360, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2024.03.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1658077X24000146>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

PAPARAMBORDA, I.; DOGLIOTTI, S.; SOCA, P.; ROSSING, W.A.H. A conceptual model of cow-calf systems functioning on native grasslands in a subtropical region. **Animal**, v. 17, n. 10, p. 100953, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.animal.2023.100953>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1751731123002690>. Acesso em: 14 agosto 2025.

PARUELO, J.M.; OESTERHELD, M.; ALTESOR, A.; PIÑEIRO, G.; RODRÍGUEZ, C.; BALDASSINI, P.; IRISARRI, G.; LÓPEZ-MÁRSICO, L.; PILLAR, V.D. Grazers and fires: Their role in shaping the structure and functioning of the Río de la Plata Grasslands. **Ecología Austral**, v. 32, n.1, p.784–805, 2022. DOI: <https://doi.org/10.25260/ea.22.32.2.1.1880>. Disponível em: https://ojs.ecologiaaustral.com.ar/index.php/Ecologia_Austral/article/view/1880. Acesso em: 14 agosto 2025.

PEINADO-TORRUBIA, P.; ALVAREZ, R.; LUCAS, M.; FRANCO-NAVARRO, J.D.; DURAN-GUTIERREZ, F.J.; COLMENERO-FLORES, J.M.; ROSALES, M.A. Nitrogen assimilation and photorespiration become more efficient under chloride nutrition as a beneficial macronutrient. **Frontiers Plant Science**, v.10, n. 13, 1058774, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1058774>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36704154/>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

PERETTI, J.; HENRIQUE, D. S.; MAYER, L. R. R.; MILITÃO, E. R.; SCHIMITZ, R.; BOGER, D. T.; RÖSLER, J. A. Chemical composition and ruminal degradability of white oat (*Avena sativa* L.) cv. IPR 126 under different nitrogen levels. **Revista Brasileira De Saúde e Produção Animal**, v. 18, n.1, p.89-102. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1519-99402017000100009>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbspa/a/FkpCrbKNZJLsNTSt7cD9S4h/?format=html&lang=pt>. Acesso em: 06 setembro 2025

PEREYRA-GODAY, F.; ROVIRA, P.; AYALA, W. RIVERO, J. Management and Productivity of Key Integrated Crop–Livestock Systems in Uruguay: The Palo a Pique Long-Term Experiment’s Third Phase. **Agronomy**, v. 12, n.12, 3023, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12123023>. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-4395/12/12/3023/review_report. Acesso em: 14 janeiro 2026.

PEZZOPANE, J.R.M.; SANTOS, P.M.; CRUZ, P.G.; BOSI, C.; SENTELHAS, P.C. An integrated agrometeorological model to simulate Marandu palisade grass productivity. **Field Crops Research**, V. 224, N. 1, 13-21, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.04.015>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037842901830011X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

PILLAR, V.D.; LANGE, O. **Os Campos do Sul**: Rede Campos Sulinos. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 192 p. 2015. Disponível em:

<http://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ecoqua.ecologia.ufrgs.br/Camposdosul/Camp os do Sul.pdf>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

PISTILLO, L. Z.; PEREIRA, P.H.B.; ARAUJO, R.D.; PAULINO, P.V.R.; DUARTE, M.S.; DETMANN, E.; SAMPAIO, C.B. Direct and carryover effects of supplementation on growth performance, metabolic profile, and intramuscular adipogenesis of grazing beef heifers. **Animal Feed Science and Technology**, v. 329, n. 11, p. 116486, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2025.116486>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377840125002810>. Acesso em: 14 outubro 2025.

POSSAMAI, E.J.; CONCEICÃO, P.C.; AMADORI, C.; BARTZ, M.L.C.; RALISCH, R.; VICENSI, M. MARX, E.F. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re)view. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, n. 10, e0210104, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210104>. Disponível em: <https://www.rbcsjournal.org/article/adoption-of-the-no-tillage-system-in-parana-state-a-review/>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

PRADO, L.G.; HABERMANN, E.; PINHO COSTA, K.A.; SILVA, L.M.; PINHO COSTA, J.V.; SEVERIANO, E.C.; COSTA, A.C.; SILVA, J.A.G.; VILELA, L.; SILVA, F.G.; MARTINEZ, C.A. Impact of different *Brachiaria ruziziensis* management practices in a crop-livestock integration system on soil health, soybean physiology, and yields. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 393, n. 11, 109808, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109808>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880925003408>. Acesso em: 14 janeiro 2025.

PRIYANKA, V. K. S.; RANA, A.; SANADYA, S. K.; KUMAR, S.; CHAUDHARY, H. K.; ARORA, A. Biochemical characterization of oat genotypes for β -glucan content and powdery mildew resistance. **Range Management and Agroforestry**, 43, n. 1, p. 212-223, 2022. DOI: <https://rmaj.in/rma/article/view/631/496>. Disponível em: <https://rmaj.in/rma/article/view/631/496>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

QUINTARELLI V.; RADICETTI, E.; ALLEVATO, E.; STAZI, S.R.; HAIDER, G.; ABIDEEN, Z.; BIBI, S.; JAMAL, A.; MANCINELLI, R. Cover Crops for Sustainable Cropping Systems: A Review. **Agriculture**, v. 12, n.12, 2076, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture12122076>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0472/12/12/2076>. Acesso em: 14 janeiro, 2026.

RAJESH, R. K.; RAM, H.; MEENA, R. K.; KUMAR, M.; VERMA, M. K.; KUMAR, S.; MAKRANA, G.; KUMAR, D.; JAT, P. L. Effect of nano nitrogen application on yield, nutrient uptake and profitability in fodder oat (*Avena sativa* L.) under north western Haryana condition. **Range Management and Agroforestry**, v.43, n. 2, p.340-344, 2022. DOI: <https://rmaj.in/rma/article/view/693>. Disponível em: <https://rmaj.in/rma/article/view/693>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

RANA, A.; PRIYANKA V. K. S.; KUMAR, S.; CHAUDHARY, H. K. Genetic diversity and combining ability studies in oat (*Avena sativa* L.) for agromorphological, yield and quality traits. **Range Management and Agroforestry**, v. 43, n.2, p.212-223, 2022. DOI:

<https://rmaj.in/rma/article/view/676/519>.

Disponível

em:

<https://rmaj.in/rma/article/view/676/519>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

REN, L.; LI, Z.; CHEN, Z.; JI, Y.; WU, P.; LIU, E.; CHEN, G.; ELENA, M.; ASSIYA, A.; JIA, Z.; SIDDIQUE, K.H.M.; WANG, Y.; ZHANG, P. Maize yield and nitrogen use efficiency are increased by optimizing nitrogen fertilizer depth under film mulching in semiarid region, **The Crop Journal**, pre proof, v.?, n.?, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cj.2025.12.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214514126000036>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

RIBAS, G.G.; ZANON, A.J.; STRECK, N.A.; PILECCO, I.B.; DE SOUZA, P.M.; HEINEMANN, A.B.; GRASSINI, P. Assessing yield and economic impact of introducing soybean to the lowland rice system in southern Brazil. **Agricultural Systems**, v. 188, n. 1, 103036, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2020.103036>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0308521X20308970>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

RICARD, M.F.; BERTHONGARAY, G.; VIGLIZZO, E.F. The Argentine Pampas: A Novel Ecosystem at the Crossroad. **Encyclopedia of the World's Biomes**, v. 5. n. 1, 117-127, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12060-3>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12060-3>. Acesso em: 23 dezembro 2025.

RIEFF, G. G., NATAL-DA-LUZ, T., RENAUD, M., AZEVEDO-PEREIRA, H. M.V. S., CHICHORRO, F., SCHMELZ, R. M., DE SA, E. L. S., SOUSA, J. P. Impact of no-tillage versus conventional maize plantation on soil mesofauna with and without the use of a lambda-cyhalothrin based insecticide: A terrestrial model ecosystem experiment. **Applied Soil Ecology**, v. 147, n.3, 103381, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.103381>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0929139319301994?via%3Dihub>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ROCHA, T.C.M.; STRECK, N.A.; ZANON, A.J.; MARCOLIN, E.; PETRY, M.T.; TAGLIAPIETRA, E.L.; BARLEST, D.; BEXAIRA, K.P., Performance of soybean in hydromorphic and non hydromorphic soil under irrigated or rainfed conditions. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.52, n. 5, p.293-302, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017000500002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/tGdDz3cynJbP7pbfQpyGzQB/?lang=en>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

RODRIGUEZ, M.P.; GABBARINI, L.A.; ESCUDERO, H.J.; WALL, L.G.; BEDANO, J.C. Earthworms mediate the effect of diversifying crop rotations on soil organic carbon incorporation, soil structure formation and microbial activity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 391, n. 10, 109751, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2025.109751>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016788092500283X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

ROMANOSKI, V.S.; OLIVEIRA, L.B.; FIGUEIREDO, G.C.; MAYER, M.A.; CAVALIERI-POLIZELI, K.M.V. Dynamic soil hydraulic properties in regenerative agriculture: Effects of crop and forest integration in livestock systems. **Soil and Tillage Research**, v. 253, n. 11, 106680, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106680>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016719872500234X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

RS (Rio Grande do Sul) **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul**. 8th ed. 2024. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, Porto Alegre, RS, Brazil. Disponível em: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/biomas>. Acesso em: 13 janeiro 2025.

SÁNCHEZ-LLERENA, J.; LÓPEZ-PIÑEIRO, A.; ALBARRÁN, Á.; PEÑA, D.; BECERRA, D.; RATO-NUNES, J.M. Short and long-term effects of different irrigation and tillage systems on soil properties and rice productivity under Mediterranean conditions. **European Journal of Agronomy**, v. 77, n. 7, p.101-110, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.04.005>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1161030116300673>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

SANTOS, A.B.D.; SILVA, M.A.S.D.; STONE, L.F.; HEINEMANN, A.B. Management of rice straw in rice-soybean succession in tropical lowland. **Revista Ceres**, v. 69, n.4, 390–399, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X202269040002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/pLdthfRZsXmnvskQBZfrXZC/?lang=en>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

SCHNEIDER, C.R.; BRAGANÇA, L.F.; GARCEZ, K.F.; UNAMUZAGA, L.V.G.; MATTEI, E.; AZEVEDO, E.B.; KROLOW, R.H.; NERES, M.A.; CASTAGNARA, D.D. Alterações no valor nutricional do feno de aveia branca na desidratação e armazenamento. **Observatório de La Economia Latinoamericana**, v.22, n.7, p. e5655-e5655, 2024. DOI: <https://doi.org/10.55905/oelv22n7-063>. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/5655>. Acesso em: 22 fevereiro 2025.

SHAHEEN, S.M.; WANG, J.; BAUMANN, K.; AHMED, A.A.; HSU, L.C.; LIU, Y.T.; WANG, S.; KUHN, O.; LEINWEBER, P.; RINKLEBE, J. Stepwise redox changes alter the speciation and mobilization of phosphorus in hydromorphic soils. **Chemosphere**, v. 288, n. 3, 132652, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132652>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653521031246>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

SILVA, A.L.; STRECK, N.A.; ZANON, A.J.; RIBAS, G.G.; FRUET, B.L.; ULGUIM, A.R. Surveys of weed management on flooded rice yields in southern Brazil. **Weed Science**, v. 70, n. 2, p. 249–258, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1017/wsc.2021.77>. Disponível em: <https://www.scopus.com/pages/publications/85122101820>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

SILVA, D. J.; QUEIROZ, A. C. **Análise de Alimentos: métodos químicos e biológicos**, 4.ed. Viçosa: UFV, 2009. 235p.

SILVA, M.A.; SIMÕES, V.J.L.P.; SILVEIRA, D.C.; SAVIAN, J.V.; KUNRATH, T.R.; DUARTE, L.P.; COSER, T.R.; JUNKLEWITZ, P.; DE FACCIO CARVALHO, P.C. Effects of Nitrogen Sources on Primary and Secondary Production from Annual Temperate and Tropical Pastures in Southern Brazil. **Nitrogen**, v. 5, n. 5, 483–497, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/nitrogen5020031>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-3129/5/2/31>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

SIQUEIRA, G.N.; TIECHER, T.L.; ALVES, L.A.; TASSINARI, A.; GRANDO, D.L.; DRESCHER, G.L.; BRUNETTO, G.; GOULART, R.Z.; BORDIGNON, V.; TIECHER, T. Short-term effects of winter cover crops and summer cash crops on soil properties in Ultisol under no-tillage system in Southern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 40, n. 3, e00935, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00935>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352009425000203>. Acesso em: 30 janeiro 2026.

SMERALD, A.; KRAUS, D.; RAHIMI, J.; FUCHS, K.; KIESE, R.; BUTTERBACH-BAHL, K.; SCHEER, C.; A redistribution of nitrogen fertiliser across global croplands can help achieve food security within environmental boundaries. **Communications Earth & Environment**, v. 4, n. 1, 315, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00970-8>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43247-023-00970-8>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

SNIFFEN, C.J.; O'CONNOR J.D.; VAN SOEST P.J.; FOX D.G.; RUSSELL J.B.; A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: II. Carbohydrate and protein availability. **Journal of Animal Science**, v. 70, n. 11, p. 3562-3577, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2527/1992.70113562x>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/1459919/>. Acesso em: 12 julho 2024.

SOUZA, D.P.; BOSI, C.; MENDONÇA, F.C.; PEZZOPANE, J.R.M.; FEITOSA, T.S.; OJEDA, J.J. Structuring and parameterizing a model for simulating annual ryegrass growth. **European Journal of Agronomy**, v.170, n. 9, 127735, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2025.127735>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S116103012500231X>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

SUN, F.; FAN, L.; DENG, G.; KUZYAKOV, Y.; ZHANG, Y.; WANG, J.; LI, Y.; WANG, F.; LI, Z.; TARIQ, A.; SARDANS, J.; PENUELAS, J.; WANG, M.; PENG, C. Responses of tropical forest soil organic matter pools to shifts in precipitation patterns. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 197, n. 10, 109530, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109530>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038071724002190>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

SWASTIKA, D.K.S.; PRIYANTI, A.; HASIBUAN, A.M.; SAHARA, D.; ARYA, N.N.; MALIK, A.; ILHAM, N.; SAYEKTI, A.L.; TRIASTONO, J.; ASNAWI, R.; SUGANDI, D.; HAYATI, N.Q.; ATMAN, A.; Pursuing circular economics through the integrated crop-livestock systems: An integrative review on practices, strategies and challenges post Green Revolution in Indonesia. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, n. 12, 101269, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101269>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154324003065>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

TIECHER, T.; VELOSO, E.G.; CALEGARI, A.; SANTANNA, M.A.; GOMES, M.; CANALLI, L.B.S.; FINCHK, M.R.; CANER, L.; RHEINHEIMER, D.S. Effect of 26-years of soil tillage systems and winter cover crops on C and N stocks in a Southern Brazilian Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 44, n. 11, e0200029, 2022. DOI: <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20200029>. Disponível em:

<https://www.rbcjournal.org/article/effect-of-26-years-of-soil-tillage-systems-and-winter-cover-crops-on-c-and-n-stocks-in-a-southern-brazilian-oxisol/>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

URRUTH, L.M.; OLMEDO, G.M.; GAZZANA, A.B.; RAGUSE-QUADROS, M.; TOMAZELI, V.N.; OLIVEIRA, J.M. Profile analysis of the mandatory restoration projects in southern Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 393, n.1, 127022, 2025. DOI: 10.1016/j.jenvman.2025.127022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127022>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

VELOSO, M.G.; CECAGNO, D.; BAYER, C. Legume cover crops under no-tillage favor organomineral association in microaggregates and soil C accumulation. **Soil and Tillage Research**, v. 190, n. 7, p. 139-146, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.03.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198719303745>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

VIANA, J.G.A.; BARROS, C.A.P.; RIBEIRO, C.G.; MINELLA, J.P.G.; SANTOS, C.F.; RIBEIRO, C.M.; SILVEIRA, V.C.P. Sustainability attributes from the water-energy-food nexus: An application to livestock systems in the Brazilian Pampa biome. **Energy Nexus**, v. 12, n.12, 100248, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100248>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772427123000785?via%3Dihub>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

WARD, R.; ONDARZA, M.B. **Relative feed value (RFV) vs. relative forage quality (RFQ)**, 6 p., 2008. Disponível em: https://www.foragelab.com/Media/RFV_vs_RFQ-CVAS%20Perspective.pdf Acesso em: 21 fev. 2025.

WEBBER, C.L.; BREMER, U.F.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; ROSA, A.; SCHOLTEN, T.; SEITZ, S. Biological soil crusts as a major ecosystem component in sandization areas of the Brazilian Pampa. **Geoderma Regional**, v. 32, n. 1, e00682, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00682>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00682>. Acesso em: 26 dezembro 2025.

WEN, K.; PENG, A.; WEI, Y.; ZHANG, M.; WU, Z.; YOU, J.W.; XU, W.; LI, X.; CHEN, Y.; MA, Y.; WEI, L.; HUANG, W.; MI, B.; XIE, L.; LIAO, D.; ZHANG, W. Pumpkin rootstock enhances nitrogen-use efficiency and low-nitrogen resilience in *Benincasa hispida* via coordinated nitrogen transport and phenylpropanoid metabolism. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 230, n. 1, 110848, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2025.110848>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0981942825013762?via%3Dihub>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

WETLESEN, M.S.; ÅBY, B.A.; VANGEN, O.; AASS, L. Simulations of feed intake, production output, and economic result within extensive and intensive suckler cow beef production systems. **Livestock Science**, v. 241, n. 1, p.104229, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104229>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1871141320305758>. Acesso em: 12 agosto 2025.

WOLSCHICK, N.H.; BERTOL, I.; BARBOSA, F.T.; BAGIO, B.; BIASOLO, L.A. Remaining effect of long-term soil tillage on plant biomass yield and water erosion in a Cambisol after

transition to no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 213, n. 10, 105149, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105149>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198721002221#!>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

XIONG, X.; LIAN, H. Assessing the impact of crop–livestock integration on food security: Evidence from the Huang–Huai–Hai region of China. **Journal of Cleaner Production**, v. 538, n. 1, 147395, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.147395>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652625027520>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

YAN, Y.; LI, H.; ZHANG, M.; LIU, X.; WANG, Y.; ZHANG, L.; MA, Z.; JIANG, Y.; YANG, M. CAI, R. Occasional tillage in no-till systems: A global meta-analysis on its frequency, causes, and agronomic implications. **Soil and Tillage Research**, v. 258, n.5, 107022, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107022>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198725005768>. Acesso em: 14 janeiro 2026.

YANG, L.; MUHAMMAD, I.; CHI, Y.X.; LIU, Y.X.; WANG, G.Y.; WANG, Y.; ZHOU, X.B. Straw return and nitrogen fertilization regulate soil greenhouse gas emissions and global warming potential in dual maize cropping system. **Science of The Total Environment**, v. 853, n. 12, 158370, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158370>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969722054699?via%3Dihub>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

YUE, K.; LI, L.; XIE, J.; WANG, L.; LIU, Y.; ANWAR, S. Tillage and nitrogen supply affects maize yield by regulating photosynthetic capacity, hormonal changes and grain filling in the Loess Plateau. **Soil Tillage Research**, v. 218, n. 4, 105317, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105317>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167198722000034?via%3Dihub>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

ZANG, M.; DO NASCIMENTO, P.C.; BAYER, C.; DE TONI, C.; SILVA, E.R.; VODZIK, G.; MARTÍNEZ, C. Soil quality in hydromorphic ecosystems decrease with intensification of pre-germinated rice production, even under ecologically based production system. **Geoderma Regional**, v. 31, n. 1, e00582, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2022.e00582>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235200942200102X>. Acesso em: 13 janeiro 2026.

ZHANG, D.; WANG, H.; PAN, J.; LUO, J.; LIU, J.; GU, B.; LIU, S.; ZHAI, L.; LINDSEY, S.; ZHANG, Y.; LEI, Q.; WU, S.; SMITH, P.; LIU, H. Nitrogen application rates need to be reduced for half of the rice paddy fields in China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. n. 10, p. 265, 8–14, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.05.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880918302196?via%3Dihub>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

ZHANG, X.; ZOU, T.; LASSALETTA, L.; MUELLER, N.D.; TUBIELLI, F.N.; LISK, M.D.; LU, C.; CONANT, R.T.; DORICH, C.D.; GERBER, J.; TIAN, H.; BRUULSEMA, T.; MAAZ, T.M.; NISHINA, K.; BODIRSKY, B.L.; POPP, A.; BOUWMAN, L.; BEUSEN, A.; CHANG, J.; HAVLIN, P.; LECLERE, D.; CANADELL, J.G.; JACKSON, R.B.; HEFFER, P.;

WANNER, N.; ZHANG, W.; DAVIDSON, E.A. Quantification of global and national nitrogen budgets for crop production. **Nature Food**, v. 2, n. 7, p. 529–540, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00318-5>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43016-021-00318-5#citeas>. Acesso em: 16 janeiro 2026.

ZHANG, X.; GENT, X.Y.; LIU, Y.; ZHU, J.; JIANG, Y.; CHEN, Y.; GAO, P.; WEI, H.; DAI, Q. Two-time application of controlled-release fertilizer: Effects on wheat yield, nitrogen use efficiency, and N₂O emissions in coastal saline-alkaline soils. **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 24, n. 12, 102493, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.102493>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666154325008646>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

ZHAO, J.; FENG, X.; DENG, L.; YANG, Y.; ZHAO, Z.; ZHAO, P.; PENG, C.; FU, B. Quantifying the Effects of Vegetation Restorations on the Soil Erosion Export and Nutrient Loss on the Loess Plateau. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, n. 11, 573126, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.573126>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/plantscience/articles/10.3389/fpls.2020.573126/full>. Acesso em: 15 janeiro 2026.

ZHUANG, Q.; WU, S.; HUANG, X.; KONG, L.; YAN, Y.; XIAO, H.; LI, Y. CAI, P. Monitoring the impacts of cultivated land quality on crop production capacity in arid regions. **Catena**, v. 214, n. 7, 106263, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106263>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0341816222002491>. Acesso em: 14 janeiro 2026.