

Sensores On-the-Go Otimizam 15% da Fertilização Azotada em Forragens no Alentejo

Luís Silva^{1,2,3,4}, Caroline Brunelli^{4,5}, Raphael Moreira⁵, Sofia Barbosa^{1,6}, Manuela Fernandes⁷, Andreia Miguel⁷, Benvindo Maças^{6,8}, Constantino Valero⁹, Manuel Patanita^{6,10,11}, Fernando Cebola Lidon^{1,6}, Luís Alcino Conceição^{2,3,4}

¹Departamento Ciências da Terra, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal.

² VALORIZA - Centro de Investigação para a Valorização dos Recursos Endógenos, Instituto Politécnico de Portalegre, 7300-110 Portalegre, Portugal.

³ InovTechAgro – Centro Nacional de Competências para a Inovação Tecnológica do Sector Agroflorestal.

⁴ Escola Superior de Biociências de Elvas, Instituto Politécnico de Portalegre, Quartel do Trem, Avenida 14 de Janeiro nº21, 7350-092 Elvas, Portugal.

⁵ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo, Campus de Itapina, Espírito Santo, Colatina 29717-000 Brasil.

⁶ Centro de investigação GeoBioTec, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade NOVA de Lisboa, Campus da Caparica, 2829-516 Caparica, Portugal.

⁷ ADP –Fertilizantes, Apartado 88, 2616-907 Alverca do Ribatejo, Portugal.

⁸ Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, I.P., 7351-901 Elvas, Portugal.

⁹ LPF-TAGRALIA, Escola Técnica e Superior de Engenharia Agrícola, Alimentar e de Biosistemas (ETSI AAB), Universidad Politécnica de Madrid, Avenida Puerta de Hierro 2-4, 28040 Madrid, Spain.

¹⁰ Escola Superior Agrária de Beja, Instituto Politécnico de Beja, Rua Pedro Soares, 7800-295 Beja, Portugal.

¹¹ MED—Instituto Mediterrâneo para a Agricultura, Ambiente e Desenvolvimento e CHANGE-Instituto da Sustentabilidade e Alteração Global, Universidade de Évora, Mitra, Ap. 94, 7006-554 Évora, Portugal

Introdução

O Desafio da Eficiência do Azoto e a Oportunidade do Uso da Tecnologia

Na produção de forragens de inverno, sob clima mediterrânico a aplicação de fertilizantes azotados é uma das maiores despesas e um ponto crítico para a sustentabilidade. A resposta dos sensores próximos a doses variáveis de fertilizante azotado em culturas forrageiras de inverno sob um clima mediterrânico pode ser compreendida através do uso de várias tecnologias de sensores e seu impacto no crescimento das culturas, na eficiência do uso do azoto (NUE) e nos resultados ambientais. Esses sensores medem o estado nutricional azotado das culturas, o teor de clorofila, e, geralmente, os valores do índice de vegetação por diferença normalizada (do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*; NDVI). Patle et al., (2023) demonstraram que a dose de fertilizante tem um impacto significativo no teor de azoto (N) das folhas e no índice de clorofila, com os valores do NDVI a aumentarem ao longo do ciclo fenológico. Sistemas baseados em sensores industriais e sistemas de controlo compatíveis com a norma ISO 11783 medem respostas espectrais para ajustar as doses de aplicação de N em tempo real.

A solução passa pela Agricultura de Precisão e pela implementação da Fertilização a Dose Variável
(do inglês *Variable Rate Application*; VRA)

Esta estratégia na fertilização azotada demonstrou aumentar o N absorvido (NUp) e a NUE em 58% em comparação com a aplicação uniforme, embora os aumentos de rendi-

mento nem sempre sejam significativos (Stamatiadis et al., 2018). Hagne t al., (2025), demonstraram que a VRA levou a uma redução na aplicação de N de até 38 kg ha⁻¹ por ano, melhorando a NUE em 15% e reduzindo a variabilidade nos balanços de N. O uso de sensores para VRA pode reduzir a poluição ambiental, minimizando as perdas de N e otimizando o uso de fertilizantes. Por exemplo, Medel-Jiménez et al., (2022) mostraram uma redução de 8,6% nas emissões de CO₂ com VRA em comparação com os métodos convencionais.

A EXPERIÊNCIA, O ENCADEAMENTO E A HERANÇA DE UMA METODOLOGIA

Desde 2016, os seguintes projetos têm sido implementados em campo na Herdade da Comenda – Pólo de Inovação INIAV Elvas (4706572.00 N; 784908.00 W), que se insere na Zona Vulnerável de Nitratos de Elvas:

- MechSmart Forages (<https://mechsmartforages.ipportalegre.pt/>),
- ISOmap Forragem ALT20-03-0246- FEDER-000062 (<https://iso-mapforragem.ipportalegre.pt/>)
- Projeto PRR-C05-i03-l-000027 - LA3.3 – GEEBovMit (<https://www.iniaiv.pt/projetos/Geebovmi-LA3-3>), financiado pelo Programa operacional PRR.
- Piloto Experimental do InovTechAgro – Centro Nacional de Competências para Inovação Tecnológica do Sector Agroflorestal (<https://www.inovtechagro.pt/>)
- Projeto “Modelação da Fertilização Azotada de Culturas Forrageiras em Clima Mediterrâneo” – Bolsa de Investigação para Dou-
toramento 2024.02421.BDANA

Num itinerário de conservação de solo, através da prática de sementeira direta de forragens à base de gramíneas e leguminosas (em estreme e consociadas), com monitorização do vigor vegetativo das culturas por Detecção Remota, do teor de água no solo, cartas de produtividade e ainda a monitorização dos teores de nutrientes e matéria orgânica do solo, bem como a eficiência de uso do azoto.

Têm vindo a ser alcançados resultados de mapeamento de zonas homogêneas de solo, o benchmark do uso do fertilizante azotado aplicado, o workflow de uso de imagens de deteção remota para estimar o estado nutricional das plantas por técnicas não-invasivas, e a logística e operacionalidade de implementação de novos processos de trabalho em contexto real de campo, como o caso do uso de sensores On-the-go. Estes resultados têm vindo a ser publicados e disponibilizados em acesso livre em 8 artigos científicos em jornais internacionais com revisão por pares, indexados em Scopus, cerca de 2 dezenas de participações em conferências nacionais e internacionais, e ainda 2 trabalhos de fim de curso CTESP, 6 teses de licenciatura, 3 teses de mestrado (mais 2 no prelo), e 1 tese de PhD (em processamento).

Tecnologia em Ação: O Sensor *On-the-Go* (OTG)

O sucesso da aplicação de N através de VRA com base em sensores é promissor, no entanto, isso depende de uma calibração precisa, da compreensão das condições específicas do local e de considerações económicas (He, 2023).

O ensaio decorreu entre 30 de outubro de 2024 e 27 de março de 2025, numa parcela de sequeiro com 1,50 ha, na Herdade da Comenda — Pólo de Inovação do Instituto Nacional de Investigação Agrícola e Veterinária, em Elvas, região do Alentejo, Portugal (38,894° N, -7,055° W).

Primeiramente, validando a tecnologia on-the-go, que oferece inteligência artificial (IA) em tempo real e capacidades VRA, diferenciando-a na agricultura de precisão. A chave para esta gestão eficiente é o uso de um sensor passivo *On-the-Go* (OTG) instalado no trator (Figura 1), compatível com o protocolo ISOBUS. Este sistema inovador avalia o vigor vegetativo da cultura (através do índice NDVI) no exato momento em que o fertilizante está a ser aplicado. Em segundo lugar, adotou-se uma abordagem integrada e complementar, explorando a sinergia entre diferentes sensores para melhorar a compreensão da resposta das culturas. O terceiro objetivo foi apresentar resultados de eficiência relacionados com a NUE, destacando o impacto tanto na sustentabilidade como na produtividade.



Figura 1. Trator New Holland T5.140 dynamic command, com distribuidor de adubo Amazone ZA - TS 4200 acoplado e sensor On-The-Go no topo da cabine

Este trabalho foi realizado no contexto específico da região do Alentejo e das suas culturas forrageiras de inverno, proporcionando um “laboratório” único para validar a robustez desta tecnologia em condições mediterrânicas específicas.

O que destaca este tipo de sensor utilizado é:

- A sua capacidade de processamento com **IA integrada**. Esta IA realiza uma função crucial: limpa os dados capturados em tempo real, identificando e eliminando elementos não-vegetativos (como caminhos ou falhas de sementeira). Este pré-processamento garante que a prescrição de N é baseada exclusivamente na biomassa real da cultura, permitindo que a unidade de fertilização ajuste a dose de forma **imediata e precisa**.
- Funciona como **sensor passivo** (fonte luz externa), dependendo da luz solar natural para o seu funcionamento. Para garantir a precisão dos dados sob condições de luz variáveis ao longo do dia, o sensor está equipado com dois sensores adicionais (Figura 2) que medem tanto a **intensidade da luz** como o **ângulo da incidência** da radiação solar. Isto permite que o sistema autocalibre continuamente as flutuações na luz ambiente, garantindo uma recolha de dados fiável e consistente.



Figura 2. Sensor On-The-Go (à esquerda) e controlador, cabos de ligação à linha ISOBus, e detalhe da parte superior do sensor, onde se localizam os sensores de radiação (à direita)

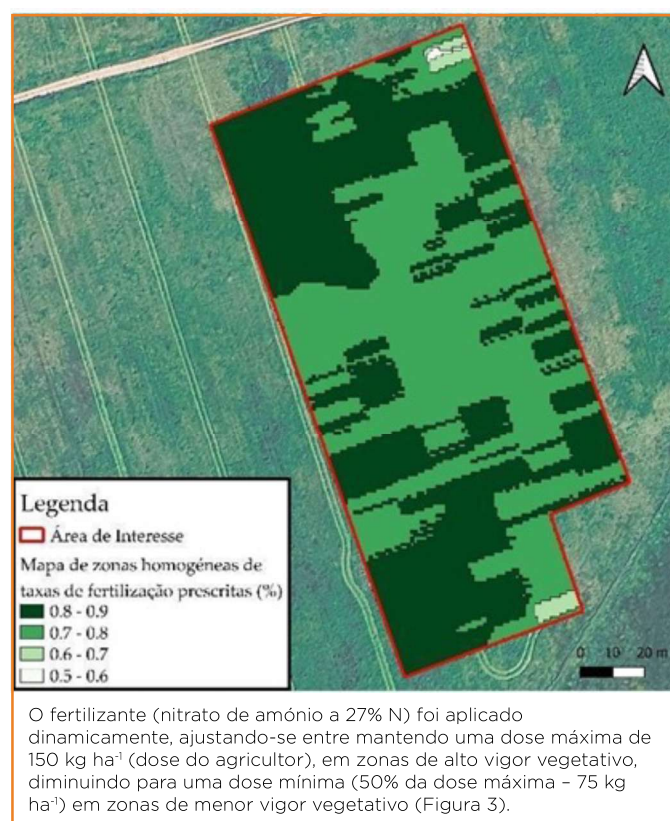


Figura 3. Mapa de zonas homogêneas de taxas de fertilização prescritas pelo sensor On-The-Go

Resultados Comprovados: Economia e Eficiência

A aplicação de taxa variável orientada pelo sensor OTG produziu resultados práticos e mensuráveis, essenciais para a rentabilidade da operação:

- 1. Poupança de Fertilizante Significativa:** A estratégia VRA resultou numa redução de 15,23% na quantidade total de fertilizante N aplicado, em comparação com a dose fixa usual de 150 kg ha⁻¹.
- 2. Ganhos Económicos:** Esta percentagem traduz-se numa poupança média de 22,90 kg ha⁻¹ de fertilizante.
- 3. Produtividade Inalterada:** É crucial sublinhar que esta otimização foi alcançada sem comprometer a produtividade da cultura. A produtividade média de Matéria Fresca (erva) atingiu cerca de 11 033,33 kg ha⁻¹.

Monitorização e Validação: O Papel dos Sensores Complementares

Para garantir uma avaliação completa da resposta da cultura, foram integrados outros sensores:

- Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT): Um drone com câmara multiespectral permitiu monitorizar o campo em alta resolução. O índice NDVI recolhido após a fertilização (VANT_II) demonstrou ser um indicador particularmente sensível ao estado nutricional, apresentando fortes correlações com a Proteína Bruta (PB) e a Absorção de Azoto (NUp) das plantas.
- Sensor de mão multiespectral: Utilizado para medições pontuais e validação em campo.

Conclusão:

O CAMINHO PARA A SUSTENTABILIDADE AGRONÓMICA

A integração de sensores óticos avançados, nomeadamente o sistema OTG para controlo de aplicação em tempo-real e os sensores complementares (VANT e sensor de mão) para avaliação detalhada, estabelece um novo paradigma para a gestão sustentável do N em culturas forrageiras de inverno. Esta abordagem da agricultura de precisão no ambiente mediterrânico:

- Otimiza a utilização de fatores de produção, gerando poupanças económicas diretas.
- Aumenta a eficiência de uso do azoto, contribuindo para a sustentabilidade ambiental.
- Garante a produtividade da cultura ao adaptar a nutrição às necessidades reais e variáveis de campo.

Para os profissionais, a tecnologia está validada e demonstra ser uma solução prática e escalável para aumentar a rentabilidade e a eficiência agronómica.

Todo o delineamento experimental, resultados, discussão e conclusões podem ser analisadas de forma mais aprofundada em Silva, L., Brunelli, C., Moreira, R., Barbosa, S., Fernandes, M., Miguel, A., Maças, B., Valero, C., Patanita, M., Lidon, F.C. & Conceição, L. A. (2025). Response of Nearby Sensors to Variable Doses of Nitrogen Fertilization in Winter Fodder Crops Under Mediterranean Climate. *Sensors*, 25(18), 5811. <https://doi.org/10.3390/s25185811>

Agradecimentos:

Os autores expressam os seus agradecimentos a todas as entidades que tornaram este ensaio possível, pelo apoio logístico e material essencial à investigação em contexto real de campo. Um agradecimento especial ao INIAV pela cedência dos campos de ensaio e à Associação de Criadores de Bovinos Mertolengos pela disponibilização das culturas instaladas. O apoio da ADP-Fertilizantes no fornecimento dos fertilizantes azotados, da Miraldino e CNH na cedência do trator, licenças de utilização, sensor on-the-go e recursos humanos alocados foi crucial para a operacionalização do ensaio.

Este ensaio enquadra-se no projeto PRR-C05-I03-I-000027 - LA3.3 - GEEBovMit, contou com o suporte dos centros de investigação: VALORIZA - Centro de Investigação para a Valorização dos Recursos Endógenos do Instituto Politécnico de Portalegre; Departamento Ciências da Terra, da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade NOVA de Lisboa; MED e CHANGE; e ainda com o suporte da Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) através do financiamento da bolsa de investigação 2024.02421.BDANA.

Referências:



XVI Congresso Nacional do MILHO '26

2º ENCONTRO DAS
CULTURAS CEREALÍFERAS

11 e 12 FEVEREIRO
CNEMA. Santarém

www.anpromis.pt

Organização:



Em colaboração:



Com o apoio de:

