

# PRODUÇÃO DE TRIGO EM PORTUGAL: IMPLEMENTAÇÃO DE NOVAS FERRAMENTAS DE FENOTIPAGEM MULTIESCALA EM ESTUDOS RETROSPETIVOS PARA APOIAR O MELHORAMENTO



Portugal é cada vez mais dependente da importação de trigo, o que representa um risco para a segurança alimentar nacional. Como contributo para revitalizar a cultura deste cereal estratégico, investigadores do ITQB-NOVA e do INIAV-Elvas estão a implementar novas ferramentas de fenotipagem de alta precisão, que permitam acelerar o processo de seleção de génotipos mais produtivos, com qualidade tecnológica adequada e mais resilientes aos stresses ambientais, para futura inscrição no Catálogo Nacional de Variedades.



Rubén Vicente<sup>(1,3)</sup>, Rita Costa<sup>(2)</sup>, Artūrs Katamadze<sup>(1,3)</sup>, Nuno Pinheiro<sup>(2)</sup>, Omar Vergara-Díaz<sup>(1,3)</sup>, Ana Sofia Bagulho<sup>(2)</sup>, Ander Yoldi-Achalandabaso<sup>(1,3)</sup>, João Reis<sup>(1,3)</sup>, Armindo Costa<sup>(2)</sup>, José Moreira<sup>(2)</sup>, Benvindo Maçãs<sup>(2,3)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Tecnologia Química e Biológica António Xavier, Universidade Nova de Lisboa (ITQB NOVA)



<sup>(2)</sup> Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária



<sup>(3)</sup> Unidade de Investigação GREEN-IT – Biorrecursos para a Sustentabilidade



### Crise nos cereais e segurança alimentar

Vive-se, atualmente, um período de grande instabilidade geopolítica e de alterações climáticas, o que afeta significativamente não só a importação e exportação de cereais, como também a sua produção. Esta circunstância tem um impacto negativo na segurança alimentar nacional, além do enorme aumento dos custos das matérias-primas que se repercutem diretamente na indústria de moagem e, conseqüentemente, no consumidor final. Entre os cereais mais consumidos na dieta mediterrânica encontra-se o trigo, que representa 20% do total de proteínas consumidas. As espécies de trigo utilizadas são o trigo-mole (*Triticum aestivum* L.) e o trigo-duro (*Triticum turgidum* subsp. *durum* L.). O primeiro é utilizado para a produção de pão, bolachas e farinha de uso geral, enquanto o segundo é

utilizado, principalmente, para a produção de massas alimentícias.

Apesar de ser um produto de primeira necessidade, Portugal não é um país autossuficiente na sua produção [Figura 1 (a)]. Em média, cada habitante consome anualmente 105 kg de trigo, mas apenas 5% provém da produção nacional (INE, 2022), uma tendência que se alterou drasticamente face aos 39% registados no início da década de 1990. A campanha de 2022/2023 marcou um mínimo histórico na produção nacional, como consequência dos baixos rendimentos provocados pelas condições meteorológicas adversas (INE, 2023, [www.ine.pt](http://www.ine.pt)).

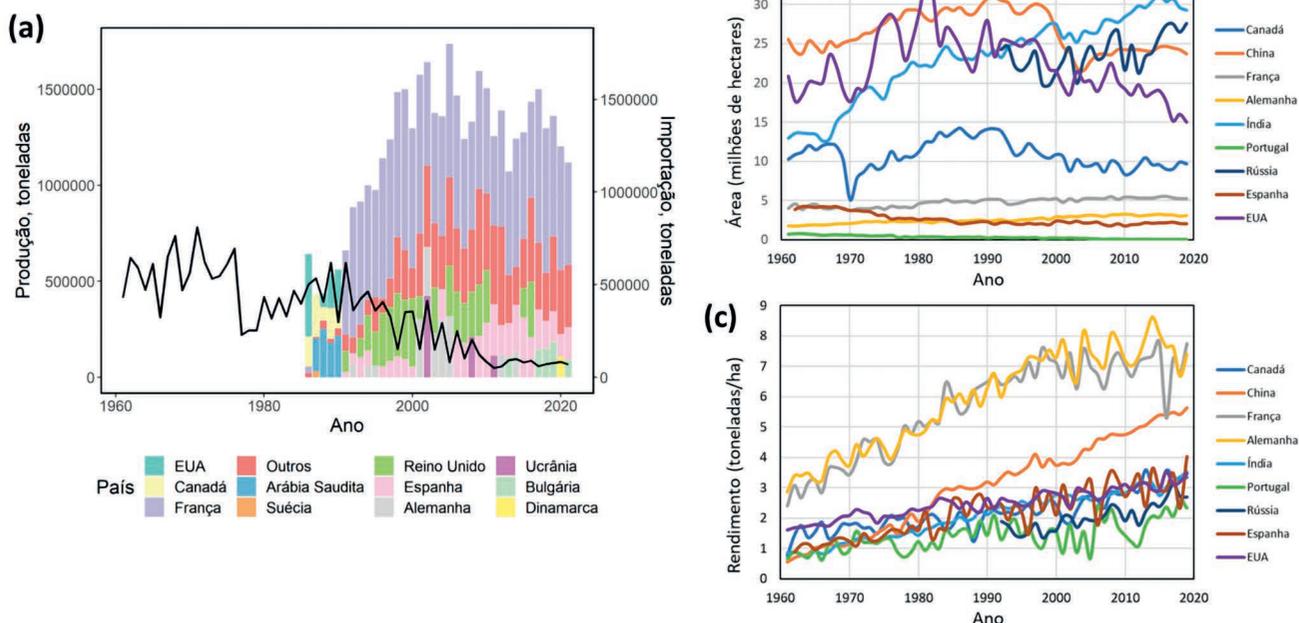
Uma das principais razões para o desequilíbrio entre o trigo consumido e o produzido deve-se a uma contínua diminuição da área cultivada ocorrida nas últimas décadas, como consequência de mudanças nas políticas agrícolas e, ainda, na preferência dos agricultores por outras culturas economicamente mais rentáveis, como a oliveira ou a amendoeira.

O declínio da produção levou a um aumento gradual das importações, principalmente dos países vizinhos da Europa Ocidental [Figura 1 (a)] e não

tanto da Europa Oriental e de outros países não pertencentes à União Europeia. Por conseguinte, a necessidade de revitalizar a cultura do trigo e de outros cereais como forma de poder garantir a segurança alimentar é evidente, embora seja difícil alterar as preferências dos agricultores nos últimos anos e de não ser possível aumentar as áreas cultivadas num futuro próximo [Figura 1 (b)].

### A importância dos programas de melhoramento: identificação de “Ideotipos de planta”

Para aumentar o rendimento e contribuir para a sustentabilidade destas culturas é necessária uma investigação de base, aplicada ao nível do melhoramento genético, de forma a que se possam compreender quais os mecanismos que contribuem para a otimização destes fatores. A nível internacional existem organizações como o CIMMYT e o ICARDA, que anualmente desenvolvem e distribuem germoplasma para os diferentes programas de melhoramento mundiais, mas é fundamental existirem programas de melhoramento nacionais que avaliem



**Figura 1** – (a) Produção nacional de trigo desde 1961 e quantidade importada por país desde 1986. (b) Área cultivada de trigo e (c) rendimento do trigo nos principais países produtores de trigo, mostrando também dados para Portugal (FAO, [www.fao.org/faostat/](http://www.fao.org/faostat/)).

a adaptabilidade dessas variedades estrangeiras em território nacional e/ou terem a capacidade de criar novas variedades utilizando germoplasma tanto autóctone como exógeno. Foi com esta premissa que, em 1942, em Elvas, foi fundada a Estação Nacional de Melhoramento de Plantas (ENMP), atualmente pertencente ao Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária (INIAV), que está vocacionada para o melhoramento de culturas arvenses como os cereais praganosos, entre outras espécies (Almeida *et al.*, 2015).

A melhoria ao nível do rendimento deve ser contínua para satisfazer as necessidades crescentes da população mundial (Evans e Lawson, 2020). A Revolução Verde, promovida por Norman Borlaug (Nobel da Paz), contribuiu para um aumento da produção mundial de trigo e de outros cereais em cerca de 40%, entre 1960 e 1990 (Evans e Lawson, 2020). No entanto, este aumento estagnou nas últimas décadas em alguns dos maiores países produtores ou com climas semelhantes a Portugal [Figura 1 (c)], como Espanha (Chairi *et al.*, 2018), Argentina (Curin *et al.*, 2021) e EUA (Maeoka *et al.*, 2020). É necessário e urgente incorporar novas tecnologias, como a fenotipagem ou a edição de genes, para identificar/desenhar os ideotipos de trigo para cada região e iniciar uma nova Revolução – Dourada (Evans e Lawson, 2020). Por ideotipo entende-se o tipo de planta ideal para um ambiente específico e/ou utilização final de acordo com as necessidades locais.

### **Estudo retrospectivo de Trigos Portugueses na ENMP (INIAV–Elvas)**

Com o objetivo de identificar o ideotipo de trigo para Portugal estão a ser realizados ensaios na ENMP, numa colaboração entre o grupo de cereais dessa instituição e o grupo de Ecofisiologia e Metabolismo Vegetal do Instituto de Tecnologia Química e Biológica António Xavier, Universidade Nova de Lisboa (ITQB NOVA). A sinergia desta colaboração reúne uma vasta experiência em melhoramento genético, realização e condução de ensaios de campo, técnicas de fenotipagem de alta preci-

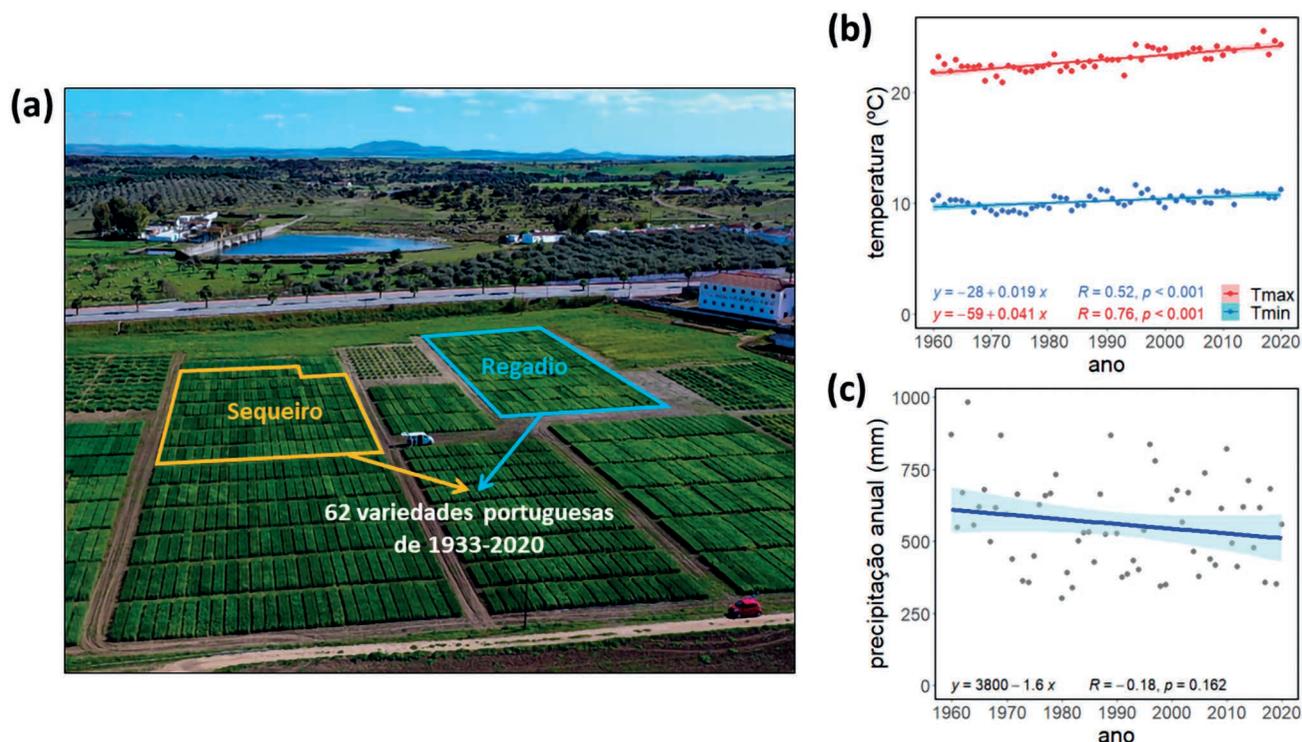
são e regulação metabólica. A identificação de um ideotipo não é uma tarefa fácil e requer estudos em muitos ambientes e durante vários anos, onde se possam avaliar diversas condições de crescimento e um grande número de variedades e parâmetros fisiológicos, agronómicos e metabólicos (Martínez-Peña *et al.*, 2023).

Neste sentido, foi implementado um estudo retrospectivo que incorporou 34 variedades de trigo-mole e 28 variedades de trigo-duro amplamente utilizadas na agricultura portuguesa desde 1933 até 2020 [Figura 2 (a)]. A inclusão de variedades antigas permite saber quais são as alterações que foram introduzidas nas últimas décadas e que ajudaram, ou não, a melhorar as características destas espécies. Nos últimos 60 anos, têm-se observado grandes alterações das condições climáticas em Elvas, com um aumento de 0,02–0,04 °C na temperatura máxima e mínima e uma diminuição de 1,6 mm na precipitação por ano, refletida essencialmente na precipitação de primavera [Figuras 2 (b) e (c): Dados obtidos na Estação Meteorológica localizada no INIAV-Elvas].

Este estudo foi realizado durante três anos agrícolas (2020/21, 2021/22 e 2022/23), tendo sido capaz de analisar os fatores relacionados com a tolerância ao stress hídrico em 62 variedades, em condições de regadio e de sequeiro [Figura 2 (a)].

### **Que alterações sofreram os trigos nos últimos 87 anos?**

Como resultado das variedades desenvolvidas na Revolução Verde, a produção por hectare dos trigos em Portugal aumentou significativamente, no entanto, verificou-se uma estagnação nas últimas três décadas [Figura 3 (a)], em consonância com a tendência global nos outros países com climas mediterrânicos. Os resultados deste estudo mostram que o trigo-duro apresenta produções mais elevadas relativamente ao trigo-mole e, ainda, maior resistência à seca. No trigo-mole, observou-se que algumas variedades modernas apresentam rendimentos muito baixos, o que se deve a um ciclo de desenvolvimento mal-adaptado às condições climáticas do sul de Portugal, associado a anos



**Figura 2** – (a) Vista aérea dos ensaios em condições de regadio e sequeiro na Estação Nacional de Melhoramento de Plantas (INIAV–Elvas). (b) Variação da temperatura máxima (Tmax) e mínima (Tmin) e (c) precipitação em Elvas de 1960 a 2020.

de seca severa, a temperaturas amenas durante o inverno e muito altas na primavera, sobretudo no período em que decorre a fase do enchimento do grão (dias entre a ântese e a maturação fisiológica). Verificou-se também que as variedades mais produtivas possuíam um maior número de espigas por área e grãos por espiga, bem como superior capacidade de translocação de fotoassimilados para a espiga durante o enchimento do grão. O tamanho do grão mostrou menos importância para a construção do rendimento final.

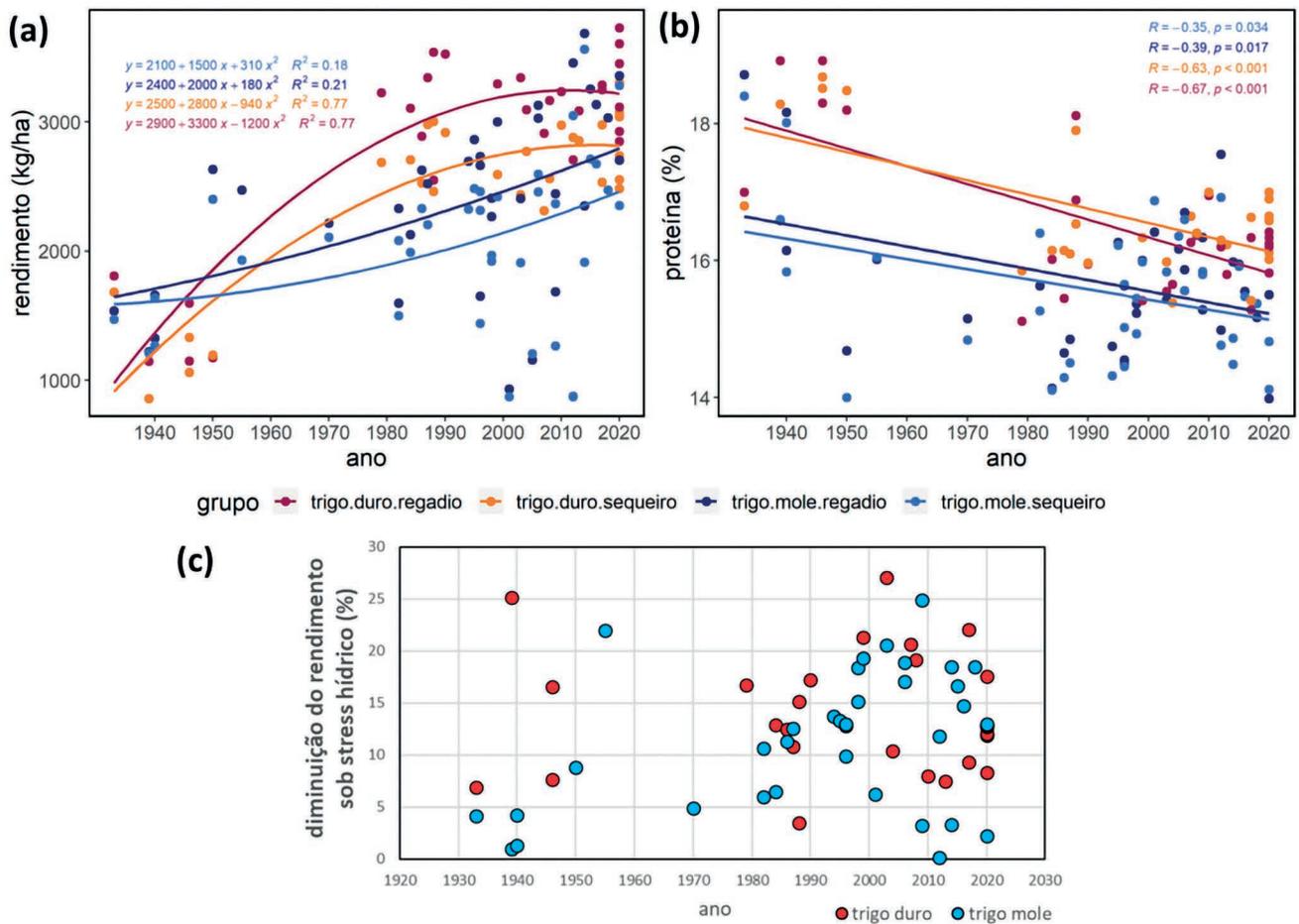
Aspetos como a estabilidade e a resiliência varietal são conceitos-chave fundamentais nos cenários climáticos atuais e futuros, que deverão ser estudados em ensaios a longo prazo e em diversos padrões ambientais.

A estabilidade de um parâmetro é uma qualidade desejada que significa que esse parâmetro é estável ao longo do tempo, sofre pouca influência das condições ambientais (Martínez-Peña *et al.*, 2023). Atualmente, estão a desenvolver-se modelos (AM-

MI, GGE, Finlay-Wilkinson, etc.; Martínez-Peña *et al.*, 2023) para identificar as variedades mais estáveis, que são de grande interesse para os agricultores e para a indústria.

Para um mesmo itinerário técnico, verificou-se que os teores de proteína são mais elevados no trigo-duro do que no trigo-mole, e que as variedades antigas mostram valores também mais altos quando comparadas com as modernas devido à produção por hectare ser mais baixa, contribuindo para maior concentração desta no grão (Katamadze *et al.*, 2023).

Comparando a diferença no rendimento observado entre as condições ótimas e limitantes neste estudo, conseguiram-se identificar variedades com resiliência ao stress hídrico [Figura 3 (c)], tais como ‘Corado’, ‘Galego Rapado’, ‘Temporão de Coruche’, ‘Mestiço’ e ‘Mocho de Espiga Branca’ (variedades antigas).

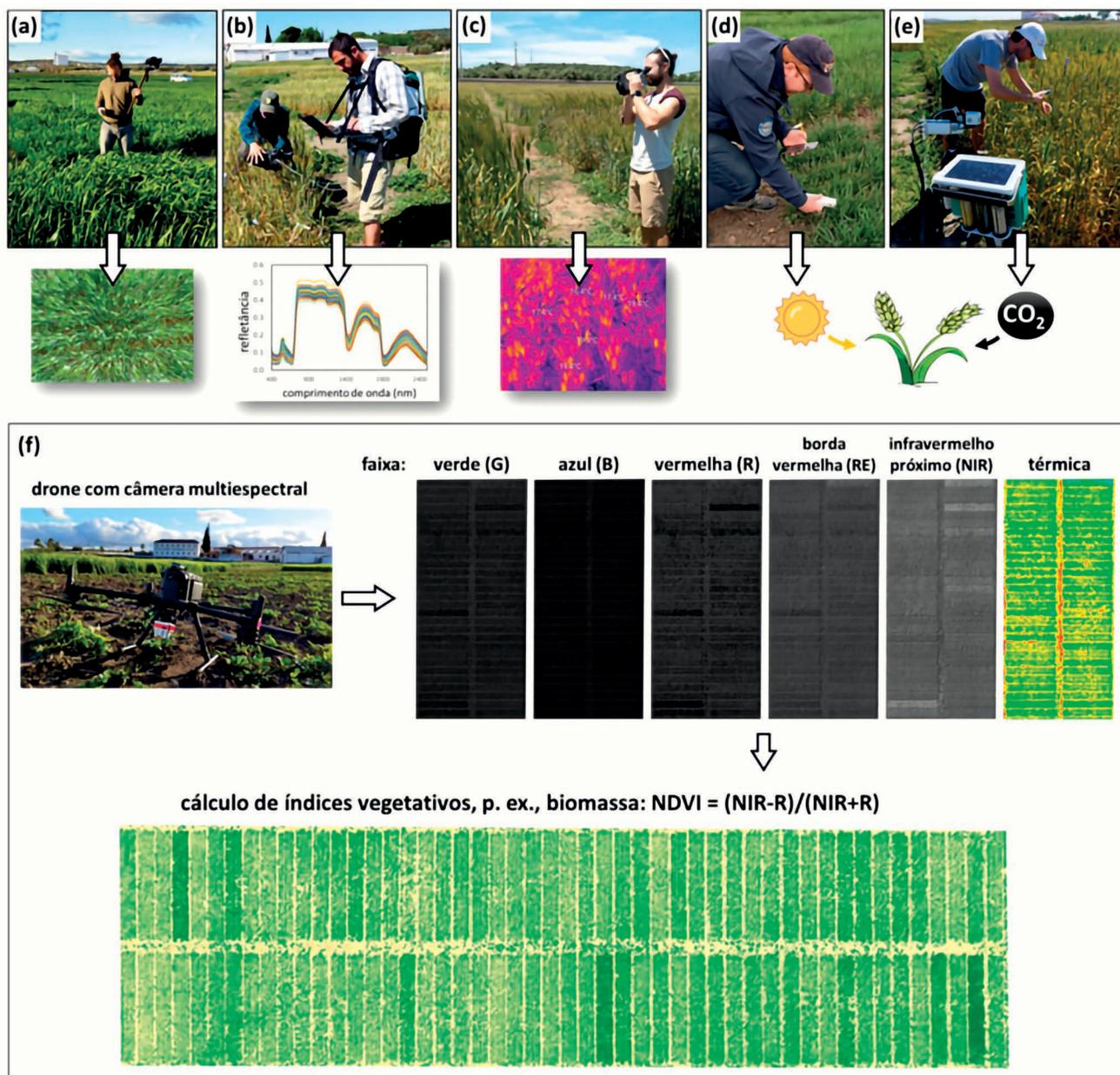


**Figura 3** – Evolução do (a) rendimento e (b) proteína do grão nas diferentes variedades de trigo-duro e mole em função da sua data de comercialização. Foi efetuado um ajustamento polinomial para o rendimento e linear para a proteína, de acordo com os resultados. (c) Índice de tolerância à seca das variedades estudadas em função da diminuição do rendimento.

### Importância da fenotipagem e da diversidade dos sensores utilizados

Para acelerar os programas de melhoramento são necessárias ferramentas que permitam avaliar o fenótipo de um grande número de variedades em distintos ambientes. A utilização de ferramentas que quantifiquem o fenótipo das plantas chama-se fenotipagem e fornece informações sobre a capacidade de crescimento, a resposta a stresses, o rendimento, entre outras. Neste momento, existem ainda algumas limitações, tais como o custo dos equipamentos e o laborioso tratamento estatístico dos dados. No entanto, tem como grande vantagem a obtenção de resultados quantitativos precisos num curto espaço de tempo. Com o apoio da Unidade

de Investigação GREEN-IT, o grupo do Investigador Rubén Vicente montou uma plataforma pioneira de fenotipagem a nível nacional, em colaboração com o grupo de cereais do INIAV-Elvas, liderado pelo Investigador Benvindo Maças. Esta plataforma é constituída por equipamentos utilizados tanto ao nível do solo [Figuras 4 (a-e)] como aéreos [Figura 4 (f)]. Ao nível do solo, permitem captar imagens RGB, espectro de refletância das plantas, imagens térmicas, fluorescência da clorofila e capacidade de troca gasosa das folhas. Estes sensores permitem o cálculo de vários índices vegetativos que estimam parâmetros relacionados com a biomassa, com a quantidade de água, azoto e pigmentos fotossintéticos, com a senescência, com a temperatura da planta, com a capacidade fotossintética (Figura 4).



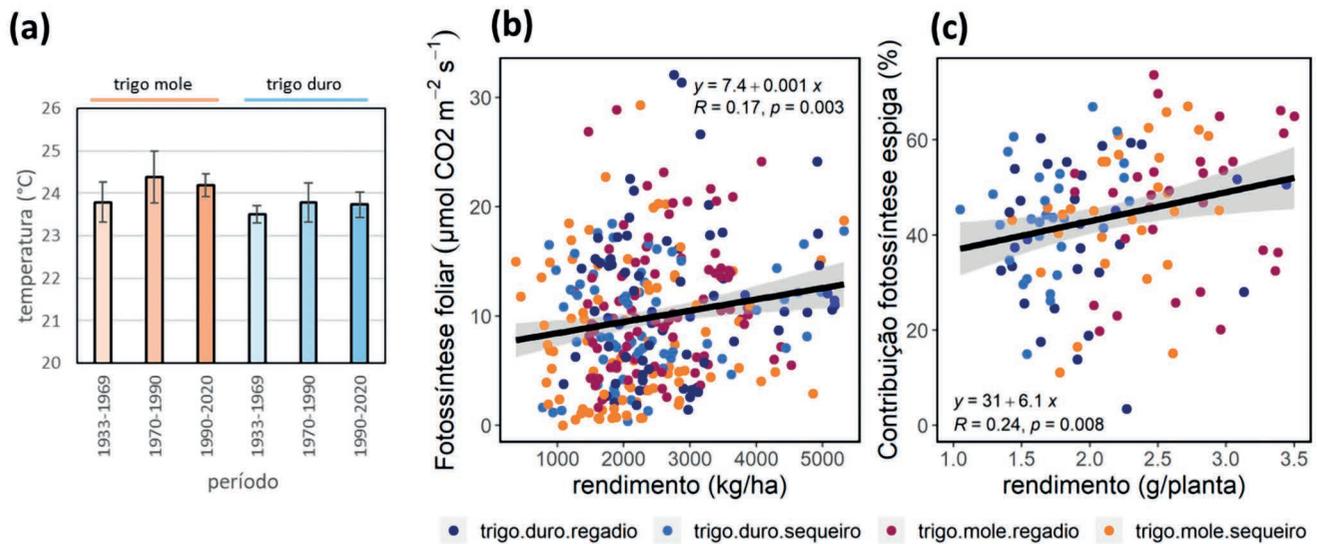
**Figura 4** – Fenotipagem a nível do solo (a–e) e aéreo (f). Foram recolhidas (a) fotografias RGB, (b) refletância do dossel de 350 a 2500 nm, (c) imagens térmicas e medições da capacidade de colheita de luz (d), fotossíntese (e) de cada variedade, ao longo do tempo. Foi ainda utilizado um drone com uma câmara multiespectral para monitorizar todo o ensaio (f).

### Temperatura da planta e fotossíntese como indicadores para o melhoramento do trigo

A temperatura da planta, medida com câmaras térmicas [Figuras 4 (c) e (f)], é um parâmetro integrativo rápido e de fácil medição e que está relacionado com a condutância estomática, o estado hídrico da planta e a resposta ao stress. Verificou-se que o

trigo-duro é uma espécie mais tolerante do que o trigo-mole, bem como as variedades mais antigas o são em relação às variedades modernas, uma vez que apresentam uma temperatura mais baixa [Figura 5 (a)].

A fotossíntese é o processo fundamental para a sobrevivência das plantas e envolve a fixação de carbono e energia para a síntese de nutrientes. O



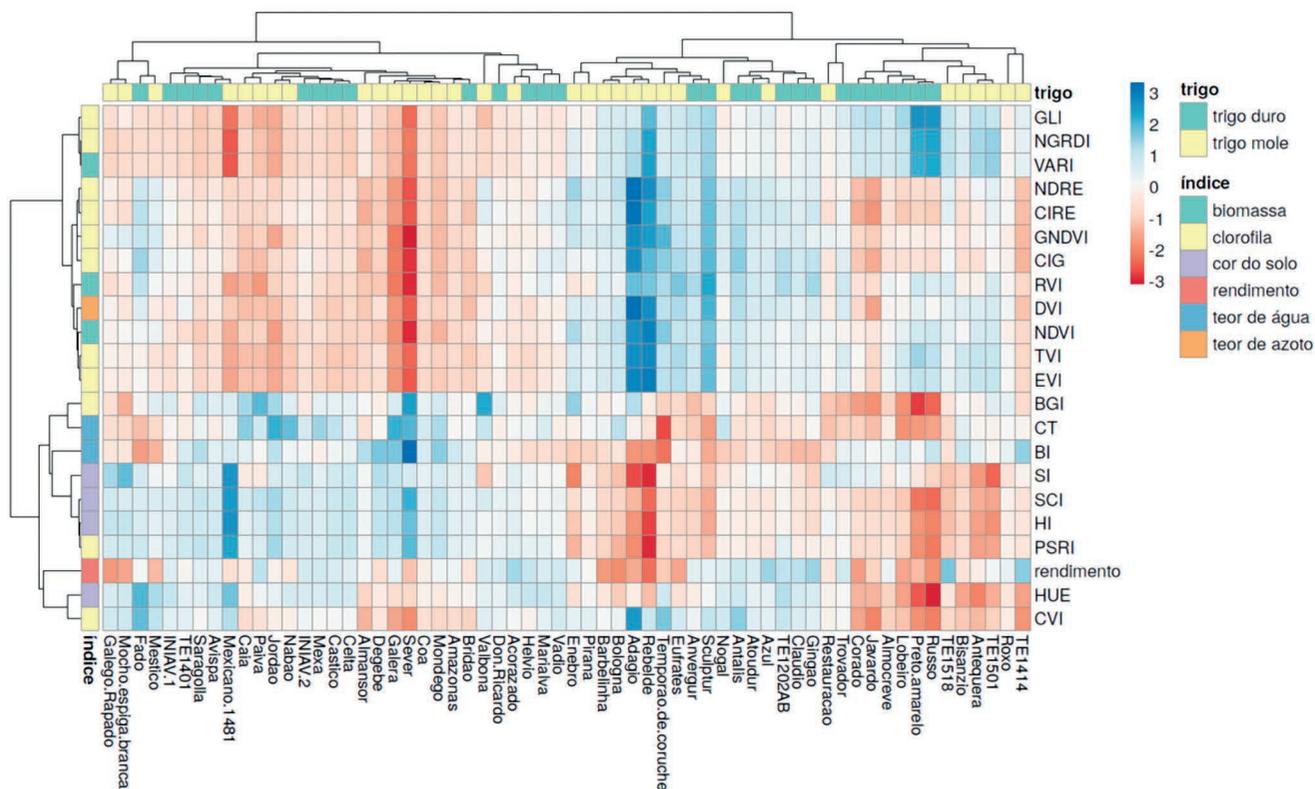
**Figura 5** – (a) Temperatura média das variedades agrupadas por períodos de comercialização. (b) Correlação entre a fotossíntese foliar ou (c) a contribuição da fotossíntese das espigas e da produtividade.

aumento da fotossíntese na folha traduz-se, geralmente, numa maior disponibilidade de nutrientes que são transportados para o grão. Com os resultados obtidos nos três anos de ensaios, observou-se uma correlação fraca, mas significativa, entre a fotossíntese foliar e o rendimento [Figura 5 (b)]. O melhoramento genético dos últimos 80 anos não melhorou este aspeto, pelo que a utilização de variedades com maior capacidade fotossintética nos programas de melhoramento poderia contribuir para aumentar o rendimento. Nos últimos anos, estes grupos têm vindo a estudar a relevância da fotossíntese noutros órgãos da planta para além da folha, como possíveis alvos, e que poderão ajudar a melhorar a produção final. É o caso das espigas que, para além de conterem os grãos, contribuem para 43% do rendimento, de acordo com uma estimativa da sua fotossíntese [Figura 5 (c)]. São também conhecidas por serem um órgão mais tolerante do que a folha em condições de stress (Sánchez-Bragado *et al.*, 2020). Embora a fotossíntese seja um parâmetro muito interessante, a sua medição é muito morosa [Figura 4 (f)] o que dificulta a determinação em ensaios de grandes dimensões, sendo preferíveis outros métodos mais expeditos.

### Vantagens na utilização de drones e câmaras multiespectrais

Embora os equipamentos ao nível do solo tenham uma alta resolução e sejam fáceis de utilizar, estes não permitem obter informação sobre grandes áreas num curto espaço de tempo (o que ajudaria a reduzir o erro das flutuações ambientais). Para ultrapassar esta situação, são utilizados sistemas aéreos não tripulados, equipados com várias câmaras, neste caso *drones* com câmaras RGB, térmicas e multiespectrais [Figura 4 (f)]. Com uma câmara de 5 bandas multiespectrais e temperatura podem ser obtidos índices vegetativos, como é mostrado um exemplo do NDVI (índice de biomassa) na Figura 4 (f). Os resultados preliminares das imagens aéreas mostram que vários índices relacionados com a clorofila, teor de água ou cor do solo (CVI, HUE, BI, PSRI, etc.) estão associados ao rendimento (Figura 6). Por conseguinte, podem ser utilizados para prever o rendimento antes da colheita e para identificar as variedades mais adequadas. As variedades ‘Adagio’, ‘Rebelde’ e ‘Sculptur’ apresentaram resultados muito diferentes das outras variedades, o que pode dever-se ao facto de terem sido desenvolvidas noutros países (França e Itália).

Com estes sensores, podem-se identificar rapidamente as variedades que possuem uma caracterís-



**Figura 6** – Resumo dos 21 índices vegetativos obtidos com o drone e a câmara multiespectral para cada uma das 62 variedades estudadas e sua relação com o rendimento.

tica desejável (teores de azoto mais elevados, vigor precoce ou *stay-green*) para posterior utilização em programas de melhoramento.

## Conclusões

Estudos retrospectivos, onde se avaliam simultaneamente variedades antigas e modernas, associados com a utilização de ferramentas de fenotipagem, podem acelerar os programas de melhoramento ao identificarem de forma rápida, precisa e económica as características desejáveis a incorporar nas futuras variedades. A reintrodução de caracteres de interesse das variedades antigas no germoplasma moderno pode ser de grande importância para melhorar características específicas relacionadas com a qualidade do grão e, principalmente, aspetos relacionados com a tolerância aos stresses ambientais, num contexto futuro de alterações climáticas. 🌱

## Bibliografia

- Almeida et al. (2015). The history of wheat breeding in Portugal. In: Bonjean, A. et al. (eds). *The world wheat book – a history of wheat breeding*, Vol. 3: Tec & Doc Lavoisier, 93–124.
- Chairi et al. (2018). *Field Crops Res.*, **228**:158–169. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.09.003>.
- Curin et al. (2021). *Field Crops Res.*, **269**:108183. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108183>.
- Evans, J.R.; Lawson, T. (2020). *J. Exp. Bot.*, **71**:2211–2215. <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa110>.
- Katamadze et al. (2023). *Crop J.*, **11**:1080–1096. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2023.06.006>.
- Maeoka et al. (2020). *Front. Plant Sci.*, **10**:1786. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01786>.
- Martínez-Peña et al. (2023). *Eur. J. Agron.*, **151**:126951. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126951>.
- Sanchez-Bragado et al. (2020). *Curr. Opin. Plant Biol.*, **56**:223–234. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2020.01.001>.