



EXPERIMENTAÇÃO ON-FARM: CONCEITOS E APLICAÇÕES NA TOMADA DE DECISÃO AGRONÔMICA

André Freitas Colaço¹

¹ Professor, Escola Superior de Agricultura 'Luiz de Queiroz' (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP) – ande.colaco@usp.br

Desde o surgimento da agricultura de precisão (AP), grandes avanços tecnológicos têm ocorrido na área de coleta de dados e em sistemas de automação em máquinas agrícolas. Dentre as tecnologias mais relevantes destacam-se o monitoramento de produtividade, o mapeamento da fertilidade do solo, ferramentas de sensoriamento de solo e plantas, além de tecnologias de automação, como controladores de taxa variável, piloto automático, entre outras.

Apesar desse progresso tecnológico, a etapa de tomada de decisão agronômica ainda permanece, em grande medida, ancorada em ferramentas tradicionais, como tabelas de recomendação de fertilizantes desenvolvidas a partir de experimentação agronômica clássica. Isso ocorre inclusive nas aplicações em taxa variável, nas quais os dados utilizados como entrada para a recomendação são locais, mas são inseridos em regras de decisão genéricas e simplificadas, que nem sempre refletem adequadamente a complexidade do sistema produtivo local. Esse descompasso entre a sofisticação dos dados disponíveis e a simplicidade das regras de decisão representa uma limitação importante para o pleno aproveitamento das tecnologias digitais e abordagens de gestão associadas à AP.

Nesse contexto, a experimentação *on-farm* surge como uma abordagem transformadora, pois permite a geração de conhecimento local sobre a resposta do sistema produtivo a diferentes estratégias de manejo. Esse conhecimento pode subsidiar a tomada de decisão de forma mais assertiva,

adaptando as práticas às condições específicas de cada área e safra e, conseqüentemente, alinhando-as aos princípios e expectativas da AP.

Conceitos da experimentação on-farm

A experimentação *on-farm* é conhecida por diferentes terminologias na literatura internacional, incluindo *on-farm experimentation* (OFE), *on-farm precision experimentation* e *farmer-centric on-farm experimentation*, também associada às abordagens de experimentação centradas no produtor. Em português, são utilizadas expressões como “experimentação de precisão” ou “experimentação em nível de fazenda”, sendo “experimentação *on-farm*” o termo mais consolidado atualmente.

De forma geral, a experimentação *on-farm* consiste em uma abordagem experimental baseada na condução de ensaios em larga escala, realizados sob condições reais de produção. Esses experimentos empregam delineamentos espacialmente distribuídos e fazem uso, em maior ou menor grau, de ferramentas e tecnologias digitais e de AP para sua implementação, monitoramento e avaliação.

Seu principal objetivo não é exclusivamente o avanço do conhecimento científico como na experimentação clássica, mas sim a geração de conhecimento local aplicado à tomada de decisão agronômica.

Essa abordagem se insere também em um contexto mais amplo de pesquisa participativa e inovação centrada no usuário, no qual há maior integração entre pesquisadores e produtores. Esse paradigma contrasta com modelos tradicionais de pesquisa *top-down*, promovendo maior transdisciplinaridade e visão sistêmica na geração de conhecimento.

A experimentação agrônômica clássica é caracterizada por ensaios conduzidos em áreas pequenas, com alto grau de controle experimental e busca de uniformidade ambiental. Seu principal objetivo é isolar o efeito de tratamentos específicos, utilizando delineamentos estatísticos bem definidos e rigorosos.

Embora esse modelo apresente elevado rigor científico, ele possui limitações operacionais, incluindo maior dependência de trabalho manual e menor representatividade das condições reais de produção. Além disso, os resultados obtidos frequentemente refletem condições médias, não capturando adequadamente a variabilidade espacial existente em áreas comerciais.

Por outro lado, a experimentação *on-farm* ocorre em larga escala, utilizando maquinário agrícola comercial e sendo incorporada às operações normais da fazenda. Ela explora a variabilidade espacial do talhão e permite a coleta de dados em condições reais de produção, com menor controle experimental, porém maior representatividade prática.

Assim, enquanto a experimentação clássica é orientada principalmente à geração de conhecimento científico generalizável, a experimentação *on-farm* é tipicamente orientada à tomada de decisão local e ao suporte direto ao manejo agrônômico.

Delineamentos experimentais

Seguindo sua natureza prática e pragmática, experimentos *on-farm* são tipicamente conduzidos em larga escala e implementados utilizando as máquinas e operações agrícolas rotineiramente empregadas pelos produtores. Os delineamentos experimentais mais comuns baseiam-se em faixas (*strip trials*) ou parcelas, com diferentes níveis de replicação, buscando conciliar rigor experimental e viabilidade operacional.

Além desses delineamentos, abordagens experimentais mais simples também podem ser empregadas, como a divisão do talhão em grandes áreas destinadas a diferentes tratamentos (por exemplo, metade do talhão para cada tratamento) ou mesmo a aplicação de tratamentos distintos em talhões inteiros. Nesses casos, a menor replicação é compensada por uma escala de análise ainda maior, na qual a propriedade agrícola pode ser tratada como um "grande experimento", com os tratamentos distribuídos entre diferentes talhões e a inferência baseada na variabilidade existente entre eles.

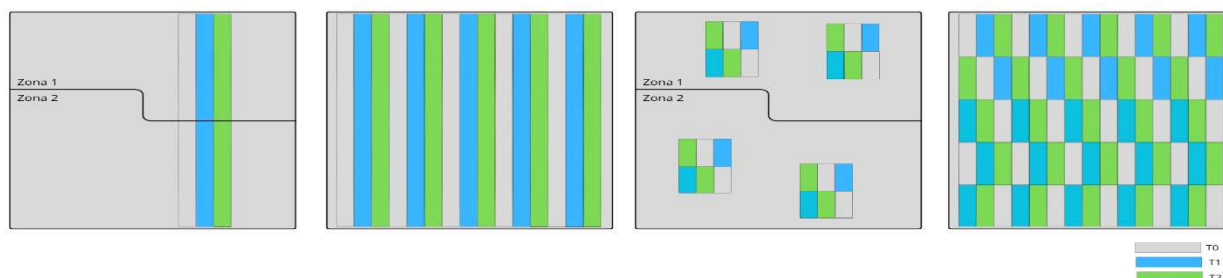


Figura 1. Tipos comuns de delineamentos experimentais: em faixa ou parcelas, com menor ou maior grau de replicação.

Além da escolha do tipo de unidade experimental (faixas ou parcelas), o planejamento completo de experimentos on-farm deve considerar:

- a variabilidade espacial da área e zonas de manejo, para o melhor posicionamento das faixas ou parcelas;
- o número de tratamentos e tipo de manejo avaliado;
- o nível de replicação espacial;
- características operacionais, como largura de equipamentos;
- a resolução espacial dos sistemas de coleta de dados.

De maneira geral, o produtor e/ou o agrônomo responsável pelo planejamento dos experimentos deve adotar critérios que favoreçam comparações confiáveis entre os

tratamentos e minimizem o erro experimental. No caso de experimentos em faixas, por exemplo, é desejável que as faixas sejam posicionadas de forma a atravessar diferentes zonas de manejo ou gradientes de variabilidade, permitindo capturar a heterogeneidade espacial da área. Ao mesmo tempo, deve-se buscar minimizar a variabilidade no sentido transversal às faixas, de modo que os tratamentos sejam comparados sob condições semelhantes ao longo de sua extensão. Em outras palavras, busca-se que o experimento represente a variabilidade existente na área, mas as unidades experimentais sendo comparadas devem estar posicionadas em locais com condições suficientemente homogêneas para que as diferenças observadas possam ser atribuídas, predominantemente, aos tratamentos e não à variabilidade inerente do ambiente.

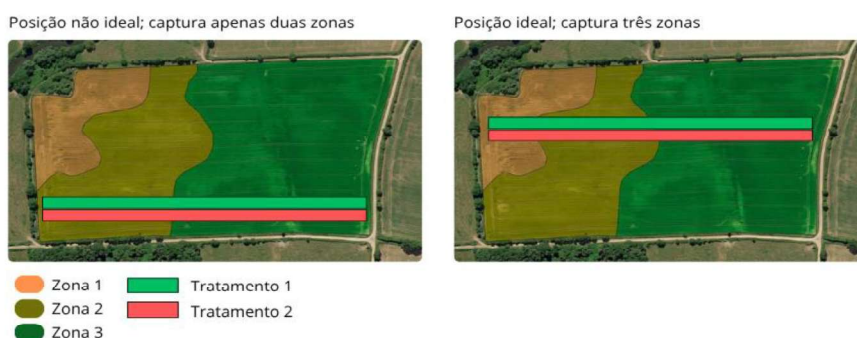


Figura 2. Posicionamento de um experimento em faixas de acordo com a distribuição espacial de zonas de manejo

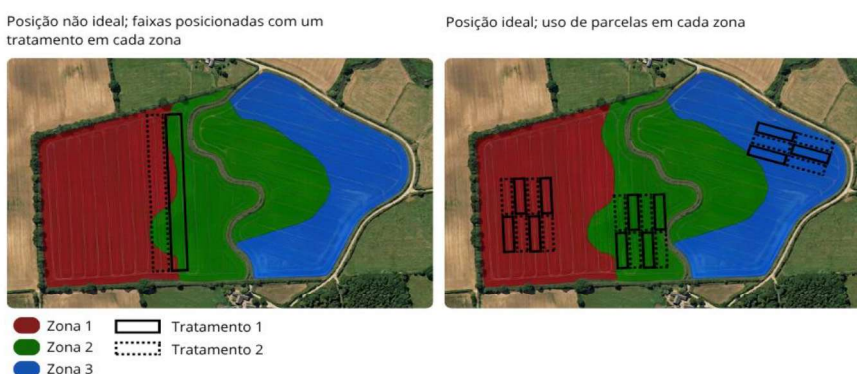


Figura 3. Posicionamento de um experimento em faixas e em parcelas de acordo com a distribuição espacial de zonas de manejo.

Tecnologias para implementação e monitoramento de experimentos on-farm

A implementação de experimentos *on-farm* é favorecida por tecnologias digitais embarcadas típicas da AP. Entre as principais tecnologias destacam-se:

- **Aplicação em taxa variável**, essencial para implementar diferentes doses conforme o delineamento experimental, além de gerar arquivos *as-applied*, fundamentais para rastreabilidade e análise;
- **Piloto automático**, que garante precisão espacial na execução dos delineamentos, assegurando alinhamento adequado das faixas ou parcelas;
- **Monitores de produtividade**, principais fontes de dados de resposta dos experimentos;
- **Sensoriamento remoto e imageamento de culturas**, utilizados como alternativa ou complemento ao monitor de produtividade, com base em indicadores de vigor vegetativo;
- **Dados de sensoriamento e outras camadas adicionais de informação**, camadas como condutividade elétrica aparente do solo, atributos de relevo, entre outras variáveis, são importantes para a análise dos resultados, pois facilitam a explicação das diferentes respostas observadas ao longo da extensão da área experimental.

Preparação de dados e análise

A etapa de análise exige um processo cuidadoso de fusão de dados (*data fusion*), integrando informações de aplicação (*as-applied*), delineamento experimental e dados de resposta. Essa integração requer a construção de um banco de dados centralizado e espacialmente consistente, o que pode ser desafiador devido às diferentes resoluções espaciais e temporais dos sistemas envolvidos. Uma vez estruturado esse banco de dados, as análises podem seguir diferentes abordagens, dependendo do objetivo experimental.

As análises em experimentação *on-farm* podem ser agrupadas em duas categorias principais:

- **Regressão:** Aplicada quando os tratamentos envolvem variáveis contínuas, como doses de fertilizantes ou densidade de semeadura. Nesse caso, busca-se modelar a resposta da cultura em função da dose aplicada, permitindo a estimativa de doses ótimas ao longo do talhão.
- **Comparação de tratamentos:** Utilizada quando os tratamentos são categóricos, como diferentes variedades ou sistemas de manejo. Nesse caso, o objetivo é comparar desempenhos entre grupos, frequentemente com base em testes de significância estatística.

Uma característica central da experimentação *on-farm* é a possibilidade de análise em múltiplas escalas espaciais. Ao contrário de abordagens tradicionais que frequentemente produzem um único resultado agregado por experimento, a experimentação *on-farm* permite avaliar respostas:

- por zonas de manejo;
- ao longo de faixas experimentais;
- ou em alta resolução espacial ao longo de todo o talhão.

Essa característica aumenta significativamente o valor informacional dos experimentos, permitindo inferências mais detalhadas sobre a variabilidade de resposta ao manejo.

Aplicação

O exemplo abaixo apresenta um mapa de recomendação de fertilização nitrogenada em taxa variável. Sobreposto ao mapa, observa-se um experimento simples em faixas, composto por três tratamentos: uma faixa com elevada dose de nitrogênio, uma com dose padrão e outra com baixa dose de aplicação. Também é apresentada uma análise baseada em regressão com janela móvel ao longo das faixas experimentais, permitindo estimar localmente a resposta da cultura à adubação nitrogenada e a dose ótima, que maximizou a lucratividade.

Os resultados dessa análise são representados pelos pontos coloridos distribuídos ao longo das faixas, nos quais é mostrada a dose ótima de nitrogênio para cada posição do experimento. Essa simples abordagem experimental e analítica permite comparar as doses utilizadas na aplicação em taxa variável com as doses ótimas estimadas a partir dos experimentos. Dessa forma, o produtor pode avaliar quão próxima sua

recomendação anterior esteve da condição ideal, validando sua estratégia de manejo e, ao mesmo tempo, gerando conhecimento específico sobre a resposta das diferentes regiões do talhão à aplicação de nitrogênio. Esse processo de aprendizado possibilita o refinamento contínuo das recomendações futuras, tornando-as progressivamente mais adaptadas às características locais do sistema de produção.

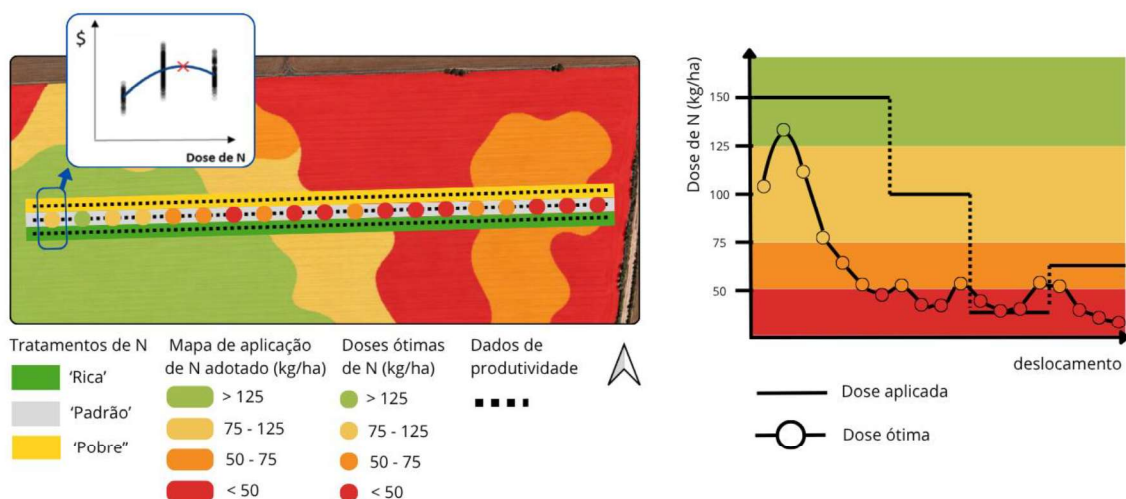


Figura 4. Exemplo de um experimento de N em faixas e comparação de doses aplicadas e doses ótimas de nutriente.

Conclusões

Os principais resultados da experimentação *on-farm* decorrem da observação da resposta da cultura a alterações no manejo. Essas alterações podem envolver, por exemplo, diferentes doses de fertilizantes, sementes ou outros insumos, a utilização de distintos produtos (fertilizantes, fitossanitários, etc.) ou a adoção de diferentes práticas de manejo do solo. A partir desses experimentos, é possível quantificar a resposta da cultura aos tratamentos e estimar a dose ou o manejo ótimo para cada talhão ou mesmo para diferentes zonas dentro de um mesmo talhão.

As informações obtidas podem ser utilizadas tanto para validar decisões de manejo previamente adotadas — por exemplo, verificando se a dose de fertilizante recomendada foi próxima da economicamente ou agronomicamente ótima — quanto para gerar conhecimento local que subsidie decisões futuras mais assertivas. Dessa forma, a experimentação *on-farm* transforma dados gerados na própria área de produção em evidências capazes de apoiar recomendações de manejo cada vez mais adaptadas às condições específicas de cada sistema produtivo.