

Fertilidade do Solo, Nutrição de Plantas e Saúde do Solo

**Como o produtor vai tomar decisão no futuro e o
que podemos aprender com outros países**

A report for



By Victor Monseff de Almeida Campos

2018 Nuffield Scholar

July 2023

Nuffield International Project No 1803

Supported by:



© 2023 Nuffield International.
All rights reserved.

This publication has been prepared in good faith on the basis of information available at the date of publication without any independent verification. Nuffield International does not guarantee or warrant the accuracy, reliability, completeness or currency of the information in this publication nor its usefulness in achieving any purpose.

Readers are responsible for assessing the relevance and accuracy of the content of this publication. Nuffield International will not be liable for any loss, damage, cost or expense incurred or arising by reason of any person using or relying on the information in this publication.

Products may be identified by proprietary or trade names to help readers identify particular types of products but this is not, and is not intended to be, an endorsement or recommendation of any product or manufacturer referred to. Other products may perform as well or better than those specifically referred to.

This publication is copyright. However, Nuffield International encourages wide dissemination of its research, providing the organisation is clearly acknowledged. For any enquiries concerning reproduction or acknowledgement contact the Publications Manager via enquiries@nuffield.com.au

—

Esta publicação foi preparada de boa fé com base nas informações disponíveis na data de sua publicação, sejam elas oriundas da literatura, de pesquisa ou de verificação em campo durante as viagens da bolsa, sem qualquer verificação independente. A Nuffield International não se responsabiliza por tais informações, sendo a redação do relatório de total responsabilidade do bolsista.

Os leitores são responsáveis por avaliar a relevância e exatidão do conteúdo desta publicação. A Nuffield International não será responsável por qualquer perda, dano, custo ou despesa incorrida decorrente do uso ou confiança de qualquer pessoa nas informações desta publicação.

Esta publicação tem direitos autorais. No entanto, a Nuffield International incentiva a ampla divulgação de sua pesquisa, desde que a organização seja claramente reconhecida.

Scholar Contact Details

Victor Monseff de Almeida Campos
Ribersolo Laboratório de análises agrícolas
R. Marcos Markarian, 395 - Jardim Nova Aliança Sul,
Ribeirão Preto, SP, Brasil, CEP 14026-583
Phone: +55 16 99227-8502
Email: victor@ribersolo.com.br

In submitting this report, the Scholar has agreed to Nuffield International publishing this material in its edited form.

NUFFIELD INTERNATIONAL Contact Details

Nuffield International
Address: PO BOX 495, Kyogle, New South Wales, Australia 2474
Contact: Jodie Redcliffe
Title: Chief Executive Officer
Mobile: (+61) (0) 408 758 602
Email: jodie.redcliffe@nuffield.com.au

Plain English Summary

Project Title: Soil Fertility, Plant Nutrition and Soil Health

Project No.:	1803
Scholar:	Victor Monseff de Almeida Campos
Organisation:	Ribersolo Laboratório de análises agrícolas R. Marcos Markarian, 395 - Jardim Nova Alianca Sul, Ribeirão Preto, SP, Brasil, CEP 14026-583
Phone:	+55 16 99227-8502
Email:	victor@ribersolo.com.br
Objectives	To understand the potential and limitations of applying sensors as a soil fertility analytical method, as well as to understand how high-tech agronomic labs and consultancies have approached this solution around the world.
Background	New technologies for soil fertility analysis using sensors are being developed around the world. Recently, some Brazilian laboratories are apparently adopting such solutions, claiming to be path of no return, however, it is a challenge to get connected information in Brazil. My feeling is that many scientists are trying to figure out what techniques could work, but the communication is not always clear, and apparently there is a lack of consensus, which makes it more difficult to understand the subject in depth.
Research	The trips were divided into three stages. The first stage was the 10-day meeting in the Netherlands for the Nuffield International Congress (CSC). The second stage, which lasted six weeks, consisted of the Global Focus Program (GFP), visiting Singapore, the Philippines, Japan, Israel, the Netherlands, and the United States. The third stage consisted of individual research trips to several countries in the European Union (Czech Republic, Austria, Holland, Belgium, Germany, Italy, England and Ireland), the United States and Canada, and finally within Brazil, for comparison of the realities known abroad.
Outcomes	<p>We are experiencing a very large expansion of data availability for the farmer, with expansion of techniques (e.g., various types of sensors) and approaches (e.g., advances in soil health assessment), but we are still not efficient in simplifying this information to make it useful for the farmer to make and optimize his decisions in the field. On-farm experimentation, linked to precision agriculture technologies and approaches, may be an interesting alternative to fill this information gap.</p> <p>In general, the community of agricultural-analysis laboratories is very interested in the application of sensors to lower the cost of analysis and to enable robust analysis directly in the field. However, worldwide this application is not mature enough to have consensus about correct procedures. The author concludes that different companies and organizations conducts different procedures, seeking to evaluate and make these processes commercially viable. In parallel, some companies end up accelerating the marketing even before having the final product, which generates a lot of speculation about the technologies.</p>
Implications	It is necessary to increase cooperation among Brazilian agricultural analysis laboratories to discuss common issues and to promote the development of new technologies in a cooperative way to increase the professionalization of the sector.
Publications	The presentation of the project made for the Verde AgriTech event and in the Agro Review Podcast are available online (links below): https://www.youtube.com/watch?v=_lhlaR9bXa8 https://open.spotify.com/episode/2dRKYWxLX0iW1anpmuqAPs

Sumario executivo

A partir da segunda metade da década de 2010, muito se especulou sobre a utilização de sensores na agricultura, tanto diretamente no campo para o monitoramento das mais diversas variáveis agronômicas, quanto em laboratórios para a substituição dos métodos tradicionais de análise, que são mais demorados e usam reagentes químicos. Essa aplicação de sensores seria a modernização dos métodos tradicionais de análise do solo, que promoveria uma mudança drástica na forma de atuação atual dos laboratórios de análises agrícolas.

Em meio a esse turbilhão de informações, motivei-me em conduzir a pesquisa pela Nuffield, a qual apresenta o objetivo central de se aprofundar no conhecimento sobre potencialidades e limitações do uso de sensores de análise direta de solos para diagnóstico de sua fertilidade, entendendo quais são os tipos de sensores com potencial para essa aplicação, bem como entender como laboratórios e consultorias agronômicas ao redor do mundo têm abordado essas tecnologias.

Nas viagens pude perceber que existe sim uma expansão muito grande de tentativas de aplicações de sensores na agricultura, que ocorre principalmente em países com agricultura mais tecnificada. De forma geral, a comunidade ligada a laboratórios de análises agrícolas tem grande interesse na aplicação de sensores para baratear o custo com análises e viabilizar análises robustas diretamente no campo. Contudo, não existem muitas empresas que tem ideias concretas sobre como aplicar sensores de forma concreta e rentável, bem como não existem muitos laboratórios de análise de solo que façam combinações transparentes de sensores com os métodos tradicionais para avaliação da fertilidade do solo. Além disso, é de certa forma comum encontrar empresas que tentam avançar com o desenvolvimento de seu mercado, avançando em estratégias de marketing e divulgação, antes mesmo do desenvolvimento completo da tecnologia.

Acredito que seja estimular instituições públicas e/ou privadas a buscarem parcerias e recursos (e.g., via fundações de amparo à pesquisa) para desenvolverem procedimentos e bibliotecas espectrais de solos usando dados de sensores para viabilizar a utilização e expansão dessas tecnologias que têm alto potencial de beneficiar toda a cadeia do agro (e.g., viabilizar equipamentos *easy-to-use* para produtores e revendas, embarcar sensores em robôs e/ou máquinas agrícolas, entre outros). Assim como, acredito que naturalmente haverá avanços na integração de diferentes fontes de informação (e.g., satélite, mapas de produtividades, mapas de fertilidade, etc), viabilizando o desenvolvimento de bibliotecas com grandes quantidades de dados que permitam subsidiar, a nível de fazenda (via experimentação *on-farm*), a tomada de decisão para otimização do uso de insumos agrícolas.

Índice

Plain English Summary	3
Sumario executivo	4
Contextualização Pessoal e Motivação	6
Agradecimentos	7
Objetivos	8
Introdução	9
Capítulo 1: Revisão bibliográfica sobre sensoriamento na agricultura	11
1. O que são sensores?	11
2. Contextualização da aplicação de sensores na agricultura: campo vs laboratório	11
3. Quais os tipos de sensores disponíveis?	13
3.1. Espectroscopia vis-NIR-MIR: do sensoriamento remoto ao sensoriamento próximo	13
3.2. Espectroscopias fluorescência de raios X (XRF) e de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS): avaliação de teores totais	15
3.3. Sensores elétricos/eletromagnéticos	16
3.4. Sensores eletroquímicos	16
3.5. Sensores de raios gama	17
4. Desafios para utilização de sensores como método analítico	17
5. Perspectivas futuras para aplicação de sensores	18
Capítulo 2: Conhecimento reunido nas viagens técnicas	20
1. Organização das viagens Nuffield	20
2. Percepções da primeira etapa: encontro do CSC	20
3. Percepções da segunda etapa: GFP	21
3.1. Singapura e Filipinas	21
3.2. Japão	21
3.3. Israel	23
3.4. Estados Unidos (Carolina do Norte)	23
4. Percepções da terceira etapa: viagens individuais	24
4.1. União Europeia	24
4.2. Estados Unidos e Canadá	26
4.3. Brasil	27
Conclusões	29
Recomendações	30
References	31

Contextualização Pessoal e Motivação

Sou sócio/diretor da Ribersolo Laboratório de análises agrícolas, uma empresa familiar criada em 1979, na qual faço parte da segunda geração, desde 2012, trabalhando junto aos fundadores. Nestes últimos anos, a junção da experiência de empreendedorismo dos patriarcas com o espírito inovador da segunda geração tem sido motivadora dentro da Ribersolo, nos incentivando a desenvolver processos de análises inovadores e responsáveis. Estamos atentos ao desenvolvimento de novas tecnologias de análises, tentando nos alinhar com as inovações tecnológicas que tem acontecido nos últimos anos.



Além de atuar na Ribersolo, também sou produtor de café, abacate, lúpulo e pecuarista (recria de gado de corte) em São Sebastião do Paraíso e Guapé - MG. Essas atividades me permitem estender a visão técnica para a prática do dia-a-dia no campo. Academicamente, tenho formação em engenharia agrônoma pela UNESP (2006-2010), Jaboticabal, com um MBA em agronegócios (2012-2016) e especialização em manejo do solo (2013-2016), ambos pela ESALQ - USP. Internacionalmente, fiz o mestrado em Economia e Ciência do Café (2016), realizado pela Illy Caffè em parceria com a Universidade de Trieste na Itália. Neste mestrado também atuei como professor convidado, ministrando aulas no mesmo curso em que participei como aluno.

Ingressei na *Nuffield* em 2018, conhecendo este grupo fantástico de pessoas através do Murilo Bettarello, "Nuffieldano" em 2017. Me motivei a conduzir este projeto na *Nuffield* pois algumas novas tecnologias de análise da fertilidade do solo utilizando sensores estão sendo desenvolvidas em todo o mundo. Além disso, recentemente alguns laboratórios nacionais aparentemente estão adotando tais soluções, mencionando ser caminho sem volta. No entanto, é um desafio obter informações conectadas no Brasil. Meu sentimento é que muitos cientistas estão tentando descobrir quais técnicas poderiam funcionar, mas a divulgação nem sempre é clara e, aparentemente, faltam alguns consensos, o que torna tudo mais difícil entender o assunto com profundidade. Tenho conversado com muitos especialistas e, aparentemente, estas tecnologias não estão totalmente validadas. Motivado por este contexto, busquei conduzir este projeto, para viajar ao redor do mundo, visitando pessoas e empresas-chave e buscando entender o que vem sendo feito em outros países. Procurei conhecer não somente como as tecnologias funcionam, mas também como tem sido as tomadas de decisão e raciocínios de diversos elos das cadeias que serão impactados por essas "revoluções".

Gostaria aqui de novamente agradecer a Biotrigo, a Stara e a Ribersolo, pois são eles me possibilitaram viajar pelos 16 países durante o projeto, sendo uma experiência incrível que com certeza tem grande valor para mim e para toda a cadeia no Brasil.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer às centenas de pessoas que conheci e estão envolvidas nesse projeto, sendo um dos maiores ganhos pessoais da minha vida, conhecendo e desfrutando de momentos fantásticos com muitas pessoas novas e de grande conhecimento. Vou concentrar em algumas que não posso deixar de mencionar, sendo as seguintes pessoas e instituições:

- A *Nuffield International Farming Scholars* por fornecer a infraestrutura e o ambiente necessário para condução deste projeto;

- Aos meus patrocinadores, especialmente a Stara e Biotrigo genética, não somente pelo investimento financeiro, mas também por todas as reuniões e conhecimentos trocados, criando um projeto muito mais robusto e forte para toda a cadeia;

- Aos Nuffield Scholars que ajudaram financeiramente em meu projeto, Bob Nixon, Paul Green, Andrew Freeth, Ray Vella, Damian Murphy, David Drage, Lachie Seears, Lachie Seears, Andrew Bouffler, Paul Searle, Bruce Watson, Rowan Paulet.

- A minha família, que prestou todo suporte necessário dentro dos negócios durante minha ausência, como também um grande apoio pessoal, acreditando no meu desenvolvimento;

- A Dimitria, minha esposa, por sempre apoiar a minha busca de novos horizontes, acreditando que a distância temporária nunca seria um problema, mas sim um grande passo para evoluirmos juntos;

- A Sally Thomson, embaixadora da Nuffield no Brasil e pessoa que esteve sempre ao meu lado, apoiando e me fazendo abrir completamente a cabeça, sendo um grande exemplo e inspiração;

- Aos professores e pesquisadores da UNESP (Campus Jaboticabal), do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA - USP), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ - USP), Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), entre outras instituições, públicas e privadas, pelas várias reuniões técnicas que me deram base para explorar o mundo;

- Aos laboratórios de análises agrícolas que me receberam em um clima de cooperação para discutir novas tecnologias e as perspectivas futuras do setor;

- A todas as empresas relacionadas que abriram suas portas, muitas vezes mostrando estratégias do negócio, mas acreditando em um bem maior com a troca de conhecimento;

Obrigado a todos vocês!!

Objetivos

O objetivo principal deste projeto é entender as potencialidades e limitações da aplicação de sensores como um método analítico da fertilidade do solo, bem como entender como laboratórios e consultorias agronômicas que usam tecnologia de ponta tem encarado essa solução ao redor do mundo. Dentro deste contexto, os objetivos específicos, são:

(i) ter uma visão geral de como funcionam as avaliações de fertilidade do solo e nutrição de planta no mundo, observando como os produtores agem e tomam decisões sobre esses aspectos;

(ii) quais são as técnicas de análise da fertilidade e nutrição de plantas dentro dos laboratórios de análise, verificando a visão destes laboratórios para modernização de análises via sensores e/ou outras técnicas mais modernas;

(iii) entender mais profundamente sobre os tipos e funcionamento dos sensores utilizados para análise da fertilidade do solo e nutrição de plantas, bem como a forma que estes sensores se encaixam dentro da rotina analítica de laboratórios tradicionais;

(iv) entender como e quais são os sensores que estão sendo utilizados usados em análises agrícolas (tanto dentro, quanto fora de laboratórios) para tomada de decisão sobre a gestão agrícola como um todo, ou seja, o que já vem sendo aplicado e para qual finalidade;

(v) como diferentes empresas que utilizam tecnologia de ponta ao redor do mundo têm utilizado essas ferramentas de sensoriamento.

Introdução

Sensores inteligentes têm sido mencionados como uma ferramenta importante para a digitalização da agricultura, uma vez que eles são os principais fornecedores de informações que permitem intensificar o monitoramento de variáveis-chave nos sistemas de produção agrícola (Bacco et al., 2019). Apesar deste apelo mais recente, a aplicação de sensores diretamente no campo para avaliação de solo e plantas é uma ferramenta clássica da agricultura de precisão (AP), presente em suas abordagens desde os primeiros anos de seu desenvolvimento (Hummel et al., 1996). No entanto, os recentes avanços tecnológicos na área de engenharia e ciência de dados expandiram as possibilidades de aplicação de sensores inteligentes na agricultura (Abbasi et al., 2014). A intensificação das capacidades de monitoramento e a grande quantidade de dados produzidos pelos sensores inteligentes fornecem capacidades de tomada de decisão sem precedentes (Wolfert et al., 2017).

Além deste apelo na agricultura como um todo, também se comenta na aplicação de sensores de maneira combinada com os métodos tradicionais de laboratório, o que foi recentemente conceituado como laboratório híbrido (Demattê et al., 2019). Este conceito se refere a um processo analítico que emprega sensores (método mais sustentável) e os métodos tradicionais para realizar as determinações analíticas. Embora já conceituado, sua aplicação ainda não é amplamente difundida e muito se questiona sobre as metodologias para fazer esse conceito virar realidade.

Conversando com professores e acadêmicos, é consenso que os sensores mais explorados academicamente para predição da fertilidade do solo são espectrômetros de reflectância difusa no visível e infravermelho próximo (vis-NIR) e infravermelho médio (MIR), condutividade elétrica aparente (ECa), e eletrodos íon-seletivos (ISE). Os primeiros estudos brasileiros avaliando sensores vis-NIR e ECa foram publicados em meados dos anos 2000 (Molin et al., 2005; Nanni e Demattê, 2006), e cerca de 10 anos depois foi publicado o primeiro estudo avaliando sensores ISE (Silva e Molin, 2018). Isto mostra que estamos nos primeiros estágios de desenvolvimento de aplicações de sensoriamento de solo, principalmente no contexto brasileiro. Além disso, cientistas concluem que, em geral, usando sensores vis-NIR, MIR e ECa é possível prever a textura e matéria orgânica do solo (MO) e, em casos específicos, capacidade de troca de cátions (CTC), pH e nutrientes totais, enquanto que ao usar o ISE é possível inferir sobre íons específicos como K⁺, e H⁺ (para estimativas de pH). Entretanto, predições consistentes dos atributos químicos do solo, principalmente nutrientes extraíveis, ainda são um desafio (Molin e Tavares, 2019). Principalmente usando modelos generalistas, ou seja, que consigam analisar todas as amostras de solo.

Em paralelo a isso, mais recentemente, novas tecnologias de sensoriamento têm sido consideradas e exploradas, tal como a espectroscopia de fluorescência de raios X (XRF) e a espectroscopia de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS). Ambas técnicas avaliam

a constituição dos elementos químicos presentes na amostra, de forma rápida e sem necessitar de reagentes químicos. Aparentemente, elas complementaríamos as técnicas de sensoriamento mais tradicionais na sua limitação para avaliar os constituintes químicos do solo. Por outro lado, os estudos com essas tecnologias são ainda mais recentes, de modo que também falta informação e consensos que motivem sua aplicação prática de fato.

Neste cenário, com as viagens da Nuffield buscamos entender as potencialidades e limitações da aplicação de sensores como um método analítico da fertilidade do solo, bem como entender como laboratórios e consultorias agronômicas que usam tecnologia de ponta tem encarado essa solução ao redor do mundo. Para atender esse propósito, foi realizada uma revisão da literatura, conduzida em paralelo a diversas visitas e discussões com professores e pesquisadores renomados da área. Essa contextualização acadêmica sobre o assunto foi apresentada no Capítulo 1 deste relatório. Além disso, também foram realizadas visitas a inúmeras empresas, instituições e universidades de 16 países, que permitiram observar o que tem sido colocado em prática ao redor do mundo, bem como discutir com pessoas de visões diferentes em relação à perspectiva de aplicação de sensores na agricultura. Essa segunda etapa foi apresentada no Capítulo 2 deste relatório.

Também é válido mencionar que o contexto, motivação, *insights* e conclusões obtidas na condução deste projeto foram compartilhados em apresentações presenciais e por videoconferência, para diversos membros da cadeia, incluindo investidores, setor público e privado. Vale ressaltar entre elas a palestra no Instituto Agronômico de Campinas (IAC), em fevereiro de 2020, à convite do Pesquisador Heitor Cantarella, durante o encontro do ensaio de proficiência dos laboratórios de análise de solo do Brasil, sendo um dos eventos mais importantes dentro da cadeia de análises agrícolas em nosso país. Além desta, um outro evento de grande relevância foi a palestra para o Encontro Brasileiro dos prestadores de serviço de Agricultura de Precisão, sendo estas empresas uma das maiores fontes de disseminação de conhecimento para os produtores. Sendo assim, com estes dois eventos foi possível levar os conhecimentos das viagens da Nuffield para uma ampla rede de pessoas importantes dentro do tópico estudado. Por fim, o projeto foi apresentado em eventos online e podcast, como exemplo para a Verde AgriTech no encontro de gigantes, Agro Resenha Podcast, ViaVerde consultoria, equipe técnica da Stara, webinar Plantec AP, entre outros. Alguns links gravados estão disponíveis online abaixo.

- Apresentação para Verde AgriTech. Título: Análise de solo: tudo o que você precisa saber sobre o presente e o futuro. Realizada em 15 de junho de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=IhlaR9bXa8>
- Podcast para Agro Resenha. Título: Bota pra fazer#08: Multiempreendedor da terra. Realizada em 15 de junho de 2020. Disponível em: <https://open.spotify.com/episode/2dRKYWxLX0iW1anpmuqAPs>

Capítulo 1: Revisão bibliográfica sobre sensoramento na agricultura

1. O que são sensores?

O nome sensor é um termo genérico, utilizado em diferentes áreas (e.g., física, química, engenharia, automação, etc). O entendimento deste termo para a comunidade agrônoma combina a visão da engenharia e da química, podendo ser resumido da seguinte maneira: “Sensores são equipamentos que permitem a execução de técnicas analíticas que são capazes de mensurar um estímulo físico/químico de um atributo de interesse, permitindo a obtenção de resultados qualitativos e/ou quantitativos de forma prática e com o mínimo (ou sem nenhum) pré-tratamento de amostras”. São equipamentos que permitem a análise direta de amostras, ou seja, sem a execução de procedimentos de química úmida (e.g., digestão, solubilização, etc), tradicionalmente utilizados na análise tradicional de amostras.

2. Contextualização da aplicação de sensores na agricultura: campo vs laboratório

A expansão da aplicação de sensores diretamente no campo, operando de forma próxima (i.e., alguns metros da planta ou do solo), ocorre em paralelo ao desenvolvimento da AP e está relacionada a necessidade de intensificar o monitoramento do solo e planta, ou seja, aumentar a densidade espacial de pontos de análise no campo para o mapeamento de variáveis agrônomicas (Molin e Tavares, 2019). Desde a concepção da AP, em meados dos anos 80, ela esteve intimamente associada com o gerenciamento da variabilidade espacial do solo. Antes do desenvolvimento de tecnologias de aplicação em taxa variável e sistemas de posicionamento por satélite (GPS), os cientistas do solo já haviam realizado amostragens em grid e estavam intrigados com a alta variabilidade espacial da fertilidade do solo em campos agrícolas (Mulla e Khosla, 2016). Após avaliar mais de 70 campos agrícolas no estado de Washington (EUA) usando amostragem intensiva do solo, Dow et al. (1973a, b) concluíram que as recomendações para aplicação de fertilizantes baseadas na fertilidade média dos campos agrícolas é falha. Estes autores sugeriram a intensificação da amostragem para uma prescrição mais precisa de fertilizantes. Durante a década seguinte, o desenvolvimento de sistemas de taxa variável ajudou a implementar o manejo localizado da fertilidade do solo. Contudo, ainda havia (e ainda há) um grande desafio: Como criar mapas fidedignos de atributos de fertilidade do solo, que sejam derivados de amostragens em grids com alta densidade espacial de pontos, sem aumentar demasiadamente o custo com análises tradicionais de laboratório? O desenvolvimento de sistemas sensores compatíveis com análise diretamente no campo é uma tentativa de solucionar esse dilema. O termo sensoramento próximo do solo (SPS) foi oficialmente conceituado em 2011 por Viscarra Rossel et al. (2011), definindo-o como a aplicação de sensores de solo que operam em contato ou perto da superfície do solo (cerca de 2 m) e são compatíveis com análises in-situ.

Além dessa aplicação diretamente no campo com a finalidade de incrementar a densidade amostral de pontos analisados, outra aplicação de sistemas de sensores seria em laboratórios híbridos, onde os sensores funcionariam de forma integrada com os métodos tradicionais de análise de solo. De acordo com Demattê et al. (2019), em um laboratório híbrido, parte das amostras são analisadas por métodos tradicionais e usadas para calibrar os modelos preditivos, enquanto a maioria delas é analisada usando tecnologias de sensoriamento, usando os modelos previamente calibrados para prever os atributos do solo. Os laboratórios híbridos são uma alternativa interessante para aumentar a eficiência das análises laboratoriais com baixo impacto ambiental. Molin e Tavares (2019) mencionam que, no Brasil, devem aumentar o número de pesquisas científicas que busquem encontrar o melhor conjunto de sensores compatíveis com a análise direta para prever os atributos do solo, bem como a melhor estratégia para a calibração de modelos preditivos para análises em escala local e regional.

Em qualquer forma de aplicação, entendemos que sensores representam uma alternativa limpa e rápida para análise e digitalização de informações sobre o solo. Tanto no laboratório, quanto no campo, representam a modernização dos métodos tradicionais de análise e a possibilidade de simplificação de métodos que, por sua vez, pode permitir que futuramente estas análises sejam realizadas pelo próprio usuário usando procedimentos analíticos *easy-to-use*. A Figura 1 abaixo tenta sumarizar as possíveis aplicações de sensores de solo na agricultura.



Figura 1. Alternativas para utilização de sensoriamento e aumento da densidade de informações sobre o solo. (A) Sensores embarcados em plataformas móveis ou implementos; (B) sensores para utilização diretamente no campo de maneira estática (Agrocares, Wageningen, Holanda; <https://www.agrocares.com/en>); (C) laboratórios móveis para realização de procedimentos de

preparo de amostra e análise práticos (Agrocares, Wageningen, Holanda; <https://www.agrocares.com>); e sistemas sensores compatíveis com laboratórios móveis: (D) sistema utilizando técnica LIBS desenvolvido pela empresa Agrorobótica (São Carlos, SP, Brasil; <https://agrorobotica.com.br>) em parceria com a Embrapa Instrumentação Agropecuária (São Carlos, SP, Brasil), (E) sistema utilizando eletroforese capilar em desenvolvimento pela empresa Pessl (Weiz, Austria; <https://metos.at/imetos-mobilab>) e (F) sistema com sensores eletroquímicos da empresa OhausTM (Parsippany, NJ, EUA; <https://br.ohaus.com>) (Adaptado de Molin e Tavares, 2019).

3. Quais os tipos de sensores disponíveis?

O trabalho de Adamchuck et al. (2004) dividem os sensores com potencial para análise direta do solo em quatro classes, são eles: (i) ópticos/radiométricos, (ii) elétricos/eletromagnéticos, (iii) eletroquímicos e (iv) mecânicos. Estes, respectivamente, permitem mensurar a capacidade do solo de: (i) absorver, refletir e/ou emitir energia eletromagnética; (ii) acumular ou conduzir carga elétrica; (iii) liberar íons; e (iv) resistir a distorções mecânicas (Viscarra Rossel e Lobsey, 2016). Parte desses sensores são compatíveis com análises diretamente no campo e outros, como ainda necessitam de algum preparo de amostra, são compatíveis apenas com aplicações em laboratórios. Por exemplo, espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) precisa que o solo esteja em formato de pellet para analisá-lo, uma vez que aplicar essa técnica de solo solto produz resultados ruins (Tavares et al. 2022). Para avaliação da fertilidade do solo, as técnicas mais empregadas envolvem sensores ópticos e eletroquímicos. A seguir, detalhamos informações sobre algumas técnicas entendidas como mais promissoras para análise da fertilidade do solo.

3.1. Espectroscopia vis-NIR-MIR: do sensoriamento remoto ao sensoriamento próximo

A espectroscopia de reflectância difusa (DRS) é uma técnica de sensoriamento do solo, caracterizada por ser rápida, de baixo custo operacional, de caráter não-destrutivo, multi-informacional e compatível com pouco ou nenhum preparo de amostras (Stenberg et al., 2010). Outra característica importante da DRS é a possibilidade de registrar espectros em pontos ou por imagens, utilizando diferentes plataformas; por exemplo, utilizando sensoriamento proximal no campo, no laboratório usando material amostrado, ou plataformas de sensoriamento remoto com capacidades multi e hiperespectrais. A DRS mensurada de maneira remota, proximal (on-field) ou em laboratório é considerada uma técnica promissora para o mapeamento digital de solos (McBratney et al. 2003) e a AP (Adamchuk et al. 2004).

Diversos trabalhos científicos têm estimado com sucesso as propriedades físicas e químicas do solo usando medições em laboratório da DRS nas regiões espectrais do visível (vis; 400-700 nm), infravermelho próximo (NIR; 700-2500 nm) e infravermelho médio (MIR; 2500- 25000 nm) (Viscarra Rossel et al., 2006). Além disso, mais recentemente, a DRS tem sido aplicada com sucesso diretamente no campo com sensores embarcados (Mouazen et al., 2007; Christy, 2008) e portáteis (Dhawale et al., 2015).

A reflectância difusa consiste na porcentagem da radiação incidente que é refletida de maneira difusa pelo solo nos diferentes comprimentos de onda. A forma como o solo responde em reflectância os diferentes comprimentos de onda incidentes constituem o comportamento espectral do solo, o qual é representado por um espectro. Espectros vis-NIR trazem informações inerentes ao solo e se relacionam primariamente com seus constituintes minerais, compostos orgânicos e água (Ben-Dor, 2002). No espectro, estas informações são representadas por sua intensidade, forma e por suas absorções (feições espectrais) em comprimentos de onda específicos da radiação eletromagnética (Demattê, 2002).

Grande número de tentativas já foram feitas em solos de diversas partes do mundo para prever seus atributos físicos e químicos utilizando espectros vis-NIR. De maneira geral, calibrações para C orgânico e total, N total e teor de argila têm maiores chances de sucesso, pois argilominerais e MO são os constituintes do solo espectralmente ativos, ou seja, com feições espectrais bem conhecidas na região vis-NIR (Ben-Dor, 2002). Nutrientes disponíveis e outros atributos do solo (e.g., CTC, pH, V%) não apresentam feições de absorção nesta região espectral, portanto suas correlações com espectros vis-NIR, em pesquisas científicas, são geralmente fracas (Stenberg et al., 2010). No entanto, podem existir exceções, tal como observado por Demattê et al. (2017), para Mg e K disponíveis em solos tropicais Brasileiros; e por Mouazen e Kuang (2016) para P disponível em solos de regiões temperadas. Estas calibrações, ocasionalmente bem-sucedidas, podem ser atribuídas à covariação destes atributos com os constituintes espectralmente ativos, um comportamento observado geralmente em nível local (Kuang et al., 2012). Revisões detalhadas sobre as oscilações de desempenho de sensores vis-NIR para a predição de atributos de solos foram realizadas por Stenberg et al. (2010) e Kuang et al. (2012).

Sensores de DRS que operam na região do MIR apresentam características semelhantes aos sensores NIR em relação a seu princípio de funcionamento. No entanto, apresentam algumas particularidades quanto à praticidade de uso destes sensores, bem como maiores dificuldades para sua aplicação no campo (Reeves III, 2010). As feições de absorção do MIR ocorrem devido ao aumento de intensidade de vibrações fundamentais e, por isso, apresentam maior intensidade que as feições observadas no NIR (Demattê et al., 2016). Espectros MIR tem maior número de feições relacionadas aos minerais e compostos orgânicos do solo quando comparados com espectros vis-NIR; por esta razão, suas calibrações são geralmente mais robustas (Viscarra Rossel et al., 2011). No entanto, o preparo de amostra utilizado tradicionalmente para aquisição de espectros MIR é ligeiramente mais trabalhoso que o realizado para o vis-NIR, envolvendo a moagem do material até um tamanho de partícula oscilando entre 80–100 μm (Janik et al., 1998). Até pouco tempo atrás, sensores MIR não eram aplicados diretamente no campo devido a seus altos preços e fragilidade, os quais não compensavam o ligeiro ganho de desempenho frente a equipamentos vis-NIR (Viscarra Rossel et al., 2006). No entanto, avanços tecnológicos recentes têm permitido o desenvolvimento de protótipos portáteis, viabilizando testes em campo (Dhawale et al., 2015; Ji et al., 2016).

3.2. Espectroscopias fluorescência de raios X (XRF) e de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS): avaliação de teores totais

Ambas as técnicas têm sido empregadas há décadas como métodos analíticos de laboratório (Krug e Rocha, 2016), e agora evoluíram para equipamentos com peso e tamanho reduzidos, maior robustez e componentes mais eficientes (e.g., detectores com melhor sensibilidade), tornando-os compatíveis com aplicações na agricultura (Galuszka et al., 2015). As XRF e LIBS são técnicas espectroanalíticas que medem o conteúdo total de uma ampla gama de elementos (por exemplo, Si, Fe, Ca, K, Ti, Al, entre outros) que, em solos, podem ser usados para inferir atributos de fertilidade. Outra característica interessante dos sensores XRF e LIBS é seu caráter complementar ao sensor VNIR (O'Rourke et al., 2016), que é uma técnica difundida na ciência do solo (Stenberg et al., 2010) com extensa pesquisa relatando seu potencial para prever com sucesso atributos mineralógicos e orgânicos (Kuang et al., 2012). Em solos brasileiros, embora a pesquisa científica utilizando sensores XRF e LIBS para análise da fertilidade do solo tenha se expandido nos últimos anos (Ferreira et al., 2015; Villas-Boas et al., 2016; Silva et al., 2017; Lima et al., 2019; Andrade et al., 2020; Santos et al., 2020), a comunidade acadêmica afirma que ainda estamos nos estágios iniciais de desenvolvimento desta aplicação. Algumas questões interessantes foram observadas sobre a aplicação desses sensores para avaliação da fertilidade do solo, são elas:

- Embora sensores LIBS tenham apresentado resultados iguais ou superiores que o sensor XRF para predição de atributos de fertilidade do solo (Tavares et al., 2022), sua grande limitação se dá em função de sua necessidade de preparação de pellets; sem esse trabalhoso preparo de amostra a técnica não pode ser aplicada em amostras de solo solto. Desta forma, o LIBS, no atual estágio de seu desenvolvimento, não é compatível com aplicações in situ e, tão pouco, seria de fácil aplicação em ambiente de laboratório;
- O grande desafio atual para aplicação do XRF como uma técnica complementar às análises tradicionais de fertilidade do solo é compreender os grupos de amostras que têm compatibilidade entre si para serem modeladas em conjunto. Isso porque apesar dos resultados promissores em solos tropicais obtidos por uma série de estudos recentes, sabe-se que é comum casos de insucesso ao tentar calibrar modelos de predição em alguns conjuntos de amostras de solo, ou mesmo ao replicar tais modelos previamente calibrados em um novo conjunto amostral;
- Além disso, também é necessário entender a estabilidade temporal do desempenho dos modelos de predição após a condução de diferentes safras, bem como a condução de diferentes manejos da fertilidade do solo (e.g., aplicação de adubos solúveis e aplicação de adubos de lenta liberação alteraria o desempenho dos modelos calibrados?).

Atualmente, pesquisas estão sendo realizadas para entender e contornar o desafio das questões colocadas acima.

3.3. Sensores elétricos/eletromagnéticos

Sensores elétricos ou eletromagnéticos são bastante populares na AP para aquisição de dados da CEa do solo diretamente no campo, de maneira contínua e não-invasiva (*on-the-go*). Sensores de CEa avaliam a capacidade do solo de acumular ou conduzir carga elétrica, a qual é tradicionalmente avaliada em solos agrícolas por indução eletromagnética (e.g., EM-38, Geonics Ltd., Mississauga, ON, Canada) ou por resistividade elétrica mensurada por contato galvânico (e.g., Veris EC, Veris Technologies, KS, EUA). A alteração de propriedades físicas e químicas do solo afetam na sua capacidade de conduzir corrente elétrica, portanto podem interferir nos parâmetros medidos pelo sensor. A interpretação da CEa do solo é de certa forma dinâmica, pois recebe influência de uma combinação de fatores. No entanto, ela está intrinsecamente relacionada à umidade do solo (Corwin e Lesch, 2005). Ao mesmo tempo, também pode ser utilizada como um indicador de características, tais como salinidade, textura, umidade, densidade, capacidade de troca de cátions (CTC), entre outras (Sudduth et al., 2005).

3.4. Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos mais comuns para o sensoriamento do solo são os eletrodos íon-seletivos (ISE) e os transistores de efeito de campo sensíveis a íons (ISFET) (Gebbers e Adamchuk, 2010). Ambos sistemas sensores respondem seletivamente a um determinado íon (e.g., H^+ , K^+ , PO_4^{3-} , NO_3^-), seguindo uma relação logarítmica entre atividade do íon e um potencial elétrico, descrita pela equação de Nernst (Schirrmann et al., 2011). Sensores eletroquímicos necessitam de um elemento de reconhecimento do íon de interesse (e.g., membranas íon-seletivas), que são integrados com um eletrodo de referência, o qual permite a mensuração da diferença de potencial elétrico entre o solo e a solução padrão, dado em milivolt (mV) (Kim et al., 2009).

Sensores eletroquímicos podem atuar em contato direto com a amostra de solo úmida ou em soluções previamente preparadas (Sinfield et al. 2010). As mensurações são relativamente rápidas, necessitando de um período de estabilização da leitura, geralmente de 5 a 15 segundos (Adamchuk et al. 2005). Adamchuk et al. (1999) mostraram o potencial de aplicação de sensores eletroquímicos diretamente nas amostras de solo com umidade de campo, sem preparo de soluções, as quais eram tradicionalmente utilizadas. Esses trabalhos levaram ao desenvolvimento de uma plataforma móvel para coleta de dados de forma *on-the-go* que é atualmente um produto comercial (pH Manager, Veris Technologies, Salina, USA). Esta plataforma comercial foi avaliada em solos brasileiros por Silva e Molin (2018) e Eitelwein et al. (2016). Esses autores aplicaram diferentes metodologias para comparar o desempenho de ISE, e os resultados encontrados por ambos foram divergentes, obtendo predições com classes de acurácia variando de boa ($R^2 > 0,8$) para fraca ($R^2 < 0,1$). No entanto, quando avaliados sob condições controladas (por exemplo, avaliando exatamente a mesma porção de solo por sensores ISE e testes de laboratório), os ISE mostraram boas determinações de pH. Acadêmicos mencionam que mais estudos devem ser conduzidos em solos tropicais brasileiros para (i) a avaliação de diferentes sensores eletroquímicos; (ii) avaliação de sua sinergia com outros sistemas sensores; e (iii)

avaliação da deterioração da membrana íon-seletiva e do desempenho deste sensor ao longo do tempo.

3.5. Sensores de raios gama

O uso da espectroscopia de raios gama como técnica de sensoriamento do solo é relativamente recente e tem aumentado devido à evolução da tecnologia de detectores (Viscarra Rossel et al., 2007). A região espectral da radiação gama compreende comprimentos de onda muito curtos (alta frequência); espectrômetros passivos de raios gama geralmente mensuram a intensidade da radiação emitida entre energias de 0 a 3 MeV (Adamchuk e Viscarra Rossel, 2010). Raios gama são emitidos pelo solo devido a ocorrência natural de radioisótopos, os quais naturalmente se desintegram e produzem tal radiação. Os principais radioisótopos presentes nos solos são K (potássio), U (urânio) e Th (tório).

A distribuição espacial e concentração de radioisótopos pode estar associada aos tradicionais fatores de formação do solo (e.g., material de origem, processos pedogenéticos, etc), e também a ações antrópicas (e.g., aplicação de fertilizantes e manejo) (Wetterlind et al., 2012). Sendo assim, informações sobre mineralogia, intemperismo e propriedades químicas do solo podem ser obtidas por esta forma de sensoriamento (Nawar et al., 2017). O mapeamento dos isótopos do solo pode ser realizado através da instalação de sensores de raios gama em máquinas agrícolas, sensores comerciais para mapeamento on-the-go já estão disponíveis no mercado (e.g., SoilOptix, Ontario, Canadá).

No contexto da AP, alguns estudos têm indicado o sensoriamento com raios gama como alternativa para a predição de alguns atributos de fertilidade do solo, tais como teor de argila, CTC, pH e K disponível (Viscarra Rossel et al., 2007; Castrignanò et al. 2012; Huang et al., 2014). Viscarra Rossel et al. (2007) avaliaram a variabilidade espacial dos radioisótopos em solos agrícolas, realizando medições on-the-go com um espectrômetro portátil de raios gama montado na parte dianteira de um veículo. Os autores reportaram predições com R^2 superiores a 0,70 para teor de argila, pH e teores de Fe. Castrignanò et al. (2012) exploraram a informação do espectro de raios-gama dividindo-a em distintas maneiras: (i) contagens de raios gama emitidos pelo K; (ii) contagens de raios gama emitidos pelo Th; (iii) contagens de raios gama emitidos pelo U; e (iv) contagens totais de raios gama. Os autores observaram correlações satisfatórias entre K disponível e contagens de emissão gama pelo K na área de estudo, concluindo que as informações deste sensor podem ser utilizadas para caracterização espacial deste atributo, a fim de direcionar adubações potássicas em taxa variável. Em solos tropicais brasileiros, esta tecnologia ainda não foi aplicada para avaliação da variabilidade espacial de talhões agrícolas.

4. Desafios para utilização de sensores como método analítico

Existem uma ampla gama de possibilidades de sensores que podem ser utilizados de forma próxima para análise direta de solos. Sem dúvida, um dos principais desafios para a ampliação da

utilização de sensores como método analítico é a dinamicidade de interpretação das relações entre sensores e atributos do solo. Grande parte destas tecnologias de sensoriamento envolve a análise de espectros (são técnicas espectroanalíticas); espectros são multi informacionais e exigem estatísticas multivariadas e/ou métodos mais complexos (e.g., métodos computacionais) para analisar, extrair informações e calibrar os modelos de predição que “substituirão” os métodos tradicionais.

A calibração de modelos é realizada comparando a informação do sensor (e.g., espectro) de um conjunto de amostras com os teores (dos atributos de interesse) obtidos destas mesmas amostras pelos métodos tradicionais de laboratório, que são utilizados como referência (Kuang et al., 2012). Para a calibração de modelos de predição robustos, a estratégia de calibração e a qualidade das análises de referência são determinantes (Kuang e Mouazen, 2011). Embora esta seja a abordagem globalmente utilizada para avaliação de novas tecnologias de sensoriamento, a utilização das análises de laboratório como referência para criação de modelos de calibração tem algumas desvantagens, tais como a propensão de diferentes fontes de erro durante os processos de amostragem, preparação de amostras por secagem e moagem, e análise laboratorial (Viscarra Rossel e Bouma, 2016).

Não é incomum a observação de resultados de laboratórios discrepantes para uma mesma amostra de solo com condições homogêneas. Tais observações já foram relatadas por trabalhos brasileiros (Eitelwein, 2017; Demattê et al., 2019) e internacionais (Viscarra Rossel e Bouma, 2016). A calibração de sistemas sensores com resultados laboratoriais duvidosos interfere na avaliação de seu desempenho. Esta possibilidade deve ser levada em consideração, sendo fundamental buscar conhecer os procedimentos metodológicos de controle de qualidade do laboratório, entendendo assim a qualidade dos dados de referência.

Além disso, ainda não existe consenso sobre como fazer um modelo universal que permita analisar solos de uma região/país. A maioria das estratégias bem-sucedidas envolvem a calibração de modelos locais; a replicação desses modelos em análises de amostras de áreas diferentes nem sempre é bem-sucedida.

Outro ponto importante que precisamos avaliar envolve o objetivo da quantificação daquele atributo ou elemento do solo, que muitas vezes no sensoriamento mostrará os teores totais do solo, nem sempre gerando correlação com os teores extraíveis pela planta. Desta forma, precisamos entender sobre a possibilidade do sensoriamento conseguir quantificar os atributos, porém não necessariamente servem para avaliações agronômicas como precisamos.

5. Perspectivas futuras para aplicação de sensores

A análise de atributos químicos do solo é na verdade uma análise da interação solo-planta que tenta simular a quantidade de nutriente que estará disponível para as plantas durante o ciclo de produção, uma vez que nem tudo que está no solo, necessariamente estará disponível para

planta. Neste sentido, diversos extratores foram pesquisados em locais diferentes do mundo, sendo utilizados de acordo com a realidade de cada tipo de solo. Apesar das críticas que existem sobre estes extratores, a análise de solo fornece um bom guia para gestão da adubação em campo, com resultados já estabelecidos e com várias curvas de calibração em campo.

De todo modo, a limitação da eficácia dos extratores em simular os nutrientes disponíveis para as plantas, pode representar um potencial interessante para o uso de sensores. Isso porque as análises práticas executadas por estes equipamentos viabilizam a intensificação do monitoramento do solo, permitindo mapear o comportamento desses atributos ao longo do tempo, criando bancos de dados locais/regionais. O uso desse banco de dados de forma associada às informações em alta resolução espacial de produtividade (mapas de produtividade) e do desenvolvimento de plantas durante a safra (e.g., índices de vegetação obtidos por sensoriamento próximo ou remoto) representam ferramentas com potencial enorme no desenvolvimento de metodologias para testes on-farm (Viscarra Rossel e Bouma, 2016). Tais abordagens inovadoras permitiriam a criação de banco de dados robustos e o desenvolvimento de estratégias de gestão do uso de fertilizantes adaptadas às necessidades específicas de cada talhão, evitando a utilização de dados altamente generalizados, tal como o das aproximações regionais dos boletins de adubação.

Capítulo 2: Conhecimento reunido nas viagens técnicas

1. Organização das viagens Nuffield

As viagens Nuffield foram divididas em três etapas. A **primeira etapa** foi o encontro de 10 dias, na Holanda, para realização do Congresso Internacional da Nuffield (CSC), com todos “Nuffieldianos” do mundo discutindo o agronegócio mundial. A **segunda etapa**, que durou seis semanas, consistiu na realização do *Global Focus Program* (GFP) visando entender o agronegócio mundial na prática, onde foram visitados Singapura, Filipinas, Japão, Israel, Holanda e Estados Unidos. A **terceira etapa** consistiu em minhas viagens individuais, as quais foram divididas em três sub-etapa; na primeira visitou-se vários países na União Européia (República Tcheca, Áustria, Holanda, Bélgica, Alemanha, Itália, Inglaterra e Irlanda); na segunda, visitou-se Estados Unidos e Canadá; e na terceira, realizou-se viagens dentro do Brasil, para comparação das realidades conhecidas no exterior.

2. Percepções da primeira etapa: encontro do CSC

Foi observado que todos os temas de saúde de solo (do inglês, *soil health*) chamavam muito a atenção do público e tinham muita aderência dos participantes em sua discussão. No entanto, a percepção de participantes de diferentes partes do mundo sobre o que é *soil health* era diferente, estando bastante relacionado com a necessidade de “remediação” do solo que cada parte do mundo necessita em função de sua realidade local. Por exemplo, na Holanda, a saúde do solo está relacionada às contaminações com excesso de nutrientes (e.g., fósforo e nitrogênio) que são lixiviados e acabam contaminando corpos d'água e lençóis freáticos. Esse comportamento se dá, pois no país há uma grande concentração de produção animal, a qual fornece resíduos orgânicos de forma acessível para produtores da região, que acabam depositando uma grande concentração desses materiais em uma área pequena. Este cenário na Holanda é o completo oposto da realidade tropical brasileira, a qual está mais preocupada com a baixa fertilidade natural do solo e a manutenção de sua parte orgânica. Os solos tropicais brasileiros demandam um manejo otimizado (e.g., plantio direto, alternância de culturas, etc) e um alto aporte de resíduos orgânicos para aumentos (na maioria das vezes não muito expressivos) de seus teores de matéria orgânica. Em ambientes tropicais, tal como o Brasil, a saúde de solo está mais relacionada com solos com altos teores de matéria orgânica e com uma maior intensidade de vida no sistema.

Outra percepção obtida neste encontro está relacionada aos diferentes propósitos da condução de análises de fertilidade do solo que alguns países apresentam e que refletem em uma maior ou menor “cobrança” pelo serviço. Por exemplo, de maneira geral, na Europa análises de fertilidade do solo são realizadas para verificação de níveis extremamente altos de nutrientes, ou seja, mais com um propósito de fiscalização do governo e evitar multas, do que compreender

quantitativamente como está a fertilidade do solo para fins de fertilização. No Brasil, os produtores buscam voluntariamente serviços de análises do solo justamente tentando entender com precisão como está a fertilidade do seu solo para fazer os diagnósticos de fertilização; a produtividade destes produtores depende de um bom entendimento do seu solo. Além disso, alguns produtores que procuram os serviços de análises são extremamente técnicos que cobram por uma alta qualidade no serviço.

3. Percepções da segunda etapa: GFP

3.1. Singapura e Filipinas

Nestes países, as viagens e reuniões eram diretamente com os produtores e não envolvia muito a parte técnica voltada a aplicações de novas tecnologias. Pode-se perceber que, de maneira geral, a agricultura nesses países é mais voltada à produção básica de alimentos, com preocupação com questões de segurança alimentar, as discussões não se aprofundaram muito em aspectos mais tecnológicos. Relacionado a solos, não houve muito aprofundamento nas questões chave abordadas neste projeto, mas o tema de saúde de solo veio à tona algumas vezes com algum interesse, mas também sem muito aprofundamento técnico sobre o assunto.



Figura. Baixo nível tecnológico da agricultura nas Filipinas, utilizando tração animal.

3.2. Japão

Neste país, chamou a atenção a visita em fazendas de produtores que faziam parte de um grupo de produtores para estudo de solos, formalizada por meio de uma associação. Estes

produtores estavam preocupados com questões relacionadas aos solos; contudo, todas as análises de fertilidade dos solos desta associação estavam sendo realizadas em laboratórios dos Estados Unidos. As amostras eram enviadas para os Estados Unidos, pois segundo relatos eles ainda não tinham confiança necessária para fazer essas análises nos laboratórios no Japão. Esse acontecimento me chamou muito a atenção, caindo como um balde de água fria, pois acreditava que o Japão teria um alto nível de tecnologia para fazer as análises, mas a experiência vivenciada mostrou exatamente o contrário.



Figura. Visita a uma fazenda em que o proprietário fazia parte da associação de produtores para estudo de solos.



Figura. Agricultura Japonesa em estufa de vidro com alto nível tecnológico.

3.3. Israel

Neste país, visitamos algumas aceleradoras de Startups, algumas inclusive trazendo o assunto de tecnologias para solo. Contudo, o foco principal das inovações tecnológicas em Israel era voltado para otimização do uso da água, pois esse é o principal gargalo da agricultura deles. Em uma Startup específica que estava trabalhando com sensores não foi possível obter muitas informações, pois aparentemente eles estavam nos desenvolvimentos iniciais da tecnologia. Chamou a atenção nesta visita uma fala que mencionou que no ramo de Startups é comum quebrar a empresa 5 vezes, até acertar alguma tecnologia que vai ter resultado. Este ponto é muito válido quando pensamos do ponto de vista do amadurecimento do empreendedor, porém ao mesmo tempo que há uma tentativa de desenvolvimento da tecnologia, também existe um desenvolvimento de marketing e mercado, que muitas vezes não é compatível com o estado de amadurecimento do que está sendo desenvolvido. Dessa maneira, temos muitas tecnologias sendo lançadas e vendidas a ideia no mercado como prontas para o uso, porém com uma falsa realidade, gerando muitas frustrações posteriores para os usuários e investidores.

3.4. Estados Unidos (Carolina do Norte)

Esta viagem foi bastante proveitosa para o tema deste projeto, pois pode-se visitar a Associação de Estudo para Recuperação de solos e também o laboratório de análise de solos da Universidade da Carolina do Norte, uma das instituições que auxiliou o desenvolvimento dos métodos de análise no Brasil. Grande parte das metodologias brasileiras vieram adaptadas, em meados de 1960, para trazer as bases científicas das análises de solos no Brasil — um projeto bem-sucedido conduzido pelo então Instituto de Química Agrícola do Ministério da Agricultura (atualmente parte da Embrapa Solos), em parceria com a Universidade da Carolina do Norte e com a participação das mais expressivas instituições de pesquisa do país (Van Raij, 2011). Após isso tivemos desenvolvimentos nacionais, como a resina trocadora de cátions e ânions, que hoje tem amplo uso no Brasil.

Em relação a visita ao laboratório de análises de solo da Universidade da Carolina do Norte, foi muito interessante visitar as dependências onde o Prof. Mehlich trabalhou para desenvolver os métodos que são atualmente utilizados em diversos países e também em parte das análises no Brasil. Nesta visita também foi comentado o número global de análises de solo realizadas nos Estados Unidos, que estimam algo em torno de 16 milhões de amostras por ano, um número cerca de três vezes maior do que se estima que é realizado no Brasil hoje (em torno de 5 milhões de análises, sendo estes números não oficiais). Além disso, comentou-se que o volume de amostras analisadas anualmente no laboratório da Universidade (considerado um laboratório pequeno) está em torno de 300 mil amostras por ano. Este número é bastante expressivo, e.g., o laboratório de análises da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ - USP), uma das maiores universidades voltadas ao Agro no Brasil, realiza cerca de 30 mil amostras por ano. Este grande volume de análises por laboratório nos EUA ocorre por alguns motivos principais, além de somente ter uma demanda muito maior do mercado, mas vale a pena ressaltar três que me chamaram atenção; (i) concentração dos laboratórios, com praticamente inexistência de

laboratórios de pequeno porte; (ii) facilidade das metodologias utilizadas, com processos mais rápidos e práticos, principalmente devido aos extratores que fazem sentido para os tipos de solos americanos, mas infelizmente não temos boas reproduções ou faltam pesquisa no Brasil; e (iii) alto nível de automação e instrumentação dos laboratórios.



Figura. Visita ao laboratório de análises de solo da Universidade da Carolina do Norte, antigo local de trabalho do Prof. Mehlich.

4. Percepções da terceira etapa: viagens individuais

4.1. União Europeia

Em uma das viagens conheci o desenvolvimento de uma tecnologia para análises de solo rápidas e *user-friendly*, patrocinada por uma empresa particular que tinha ambições de comercializar essa tecnologia no futuro. A determinação de atributos de fertilidade usando essa tecnologia envolvia a agitação do solo com água, seguida da determinação usando um equipamento que utiliza o princípio da eletroforese capilar. O equipamento era interessante, mas tinha a limitação de não permitir um número grande de análises devido a necessidade de agitação. Além disso, a extração com água pode não representar muito bem as determinações de nutrientes disponíveis para plantas, as quais, no Brasil, usam resina ou ácidos fracos, portanto não tendo parâmetros de interpretação.

Na República-checa conheci uma empresa que utiliza um sensor de CEa para mapeamento do solo de talhões agrícolas. O sensor estimava a CEa por meio de indução eletromagnética e não necessitava contato direto com o solo. A ideia da empresa é que os usuários coletassem os dados no campo, e depois esses dados eram enviados para nuvem da empresa que os processava e devolvia a informação de compactação do solo, visando a descompactação localizada do solo,

em tempo real. Segundo o pessoal da empresa, a aplicação da CEa para localização de áreas compactadas era possível pois naquele país esses dados apresentavam correlação com áreas compactadas; algo que em solos brasileiros ainda precisa ser mais estudado. Além disso, a descompactação localizada era uma mercado promissor naquele país, uma vez que apresentava limitação da produção e sua condução em área total era economicamente inviável.

Na Bélgica, conheci um pesquisador da Universidade de Gante proeminente na área de sensoriamento do solo, o qual detém uma das primeiras patentes de sensor vis-NIR aplicado para mapeamento do solo diretamente no campo e com coleta de dados contínua. Para o pesquisador, é fato que as determinações de campo terão desempenho pior para determinação da fertilidade do solo; contudo, a alta densidade espacial de dados coletados dessa maneira permite inferências espaciais razoáveis, permitindo intervenções localizadas com desempenho melhor que mapeamento utilizando quantidades limitadas de amostras via grades amostrais.

Na Holanda, foi um dos poucos países que vi modelos comerciais de análise de solo usando sensores (e.g., Laboratório EuroFins e AgroCares), sendo uma empresa utilizando um esquema próximo a um laboratório híbrido e outra voltada para análises de campo e com foco em países da África. Foi interessante observar que o laboratório que utiliza sensores, divulga os dados dos sensores também como um dado complementar, e.g., determinações de matéria orgânica via sensores e também via métodos tradicionais; contudo, os dados dos sensores podem ser voltados para o escalonamento das análises. A empresa que atua com sensores diretamente no campo acredita que futuramente terá modelos que abranjam vários países. De todos modos, minha percepção é que eles direcionam os sensores para mercados que não cobram um desempenho tão alto das determinações; além disso, os diagnósticos são mais qualitativos, e.g., indicação de teor baixo e alto.

Na Inglaterra, observou-se que as análises de solo são concentradas (praticamente 90% delas) em apenas dois laboratórios; por outro lado, o volume de análises do país não é tão grande (aproximadamente 600.000 análises ano⁻¹). Ainda na Inglaterra, visitamos empresas de agricultura de precisão, onde vi um caso específico muito interessante, onde a empresa de agricultura de precisão foi vendida junto com uma empresa de nutrição animal para uma empresa especializada em análise de dados. Neste caso, a empresa compradora acreditava que as empresas especializadas na técnica agrônômica trabalhavam com muitas técnicas de aquisição de dados, mas não sabia processar esses dados, convertendo-os em informações. Isso me chamou a atenção, pois talvez seja uma estratégia interessante combinar capacidade técnica com big data para tomadas de decisão mais assertivas no campo.

Na Irlanda, também observou-se um volume pequeno de amostras de solo analisadas por ano e este volume concentrado em poucas empresas que fazem essa análise. Não percebi um uso grande de sensores de solo na Irlanda, onde as análises são realizadas principalmente por

questões de controle ambiental e regulamentações do estado, e não para avaliação da fertilidade do solo para fins de fertilização (semelhante ao que ocorre na Holanda).

4.2. Estados Unidos e Canadá

Nos EUA, o que chamou bastante atenção foi que o mercado de análise de solo já se consolidou muito. Aparentemente, a maior parte dos laboratórios são de grande porte, alguns com volumes altíssimos de análises (e.g., 30.000 amostras por dia). De maneira geral, laboratórios que trabalham com altos volumes diários de amostras investem em logística para levar amostras de outras regiões do país até eles. Por outro lado, alguns grupos com volume um pouco menor por laboratório, investem em abrir novas franquias em diferentes regiões.

Nos EUA, as análises de rotina são baseadas em métodos mais simples pensando em operacional para os laboratórios (e.g., Mehlich-3, Olsen ou Bray), a única complexidade seria em definir qual dessas rotinas deve ser utilizada, escolha que é realizada em função do pH do solo, dado que eles apresentam solos agrícolas tanto com caráter ácido quanto básico. Portanto, alguns laboratórios realizam a determinação do pH e, com essa informação, fazem a triagem de amostras para definir a metodologia de análise. Ao comparar a agilidade dos métodos utilizados no EUA com os que são aplicados no Brasil (principalmente o método usando resina trocadora de cátions e ânions), entendemos a razão do maior volume de amostras que eles conseguem. O método Mehlich-3 até poderia ser aplicado em solos tropicais brasileiros, no entanto, os valores obtidos com ele são diferentes e não existe pesquisa de base que promova a interpretação desses valores para as condições agrícolas brasileiras. Ou seja, embora o método seja compatível, sua execução não teria mercado, pois não existem boletins agronômicos que subsidiem sua interpretação até o momento.

Um pouco mais relacionado a Agricultura de Precisão, senti que os agricultores norte americanos parecem estar mais familiarizados em trabalhar com dados da lavoura, tanto utilizando diferentes fontes de informação (e.g., sensores embarcados, estações climatológicas, mapas de produtividade e imagens de satélite), quanto com maior densidade de amostragens por hectare (e.g., uma ou mais amostras por hectare) ao comparar com o que é utilizado no Brasil (e.g., uma amostra para representar vários hectares). Por outro lado, também vi empresas falando que na coleta de amostras em grade amostral, apesar de utilizarem uma densidade alta de amostras por hectare, eles não coletavam subamostras para representar o ponto amostral. Esse procedimento é facilmente questionável, dada a heterogeneidade em microescala que o solo pode ter. Algumas empresas americanas de agricultura de precisão estavam conduzindo trabalhos com pesquisas *on-farm* para calibração de suas recomendações. Ou seja, envolviam ferramentas tecnológicas (e.g., dados de produtividade, dados de sensores, análise de dados via software desenvolvido pela empresa) para fazer ensaio de aplicações em taxa variável de diferentes insumos (e.g., fertilizantes, população de plantas, etc) adaptadas para as particularidades de cada campo (e.g., suas particularidades de solo, seu microclima, suas variedades, etc). Esses ensaios permitem otimizar as tomadas de decisão dos produtores, no

entanto, demanda aptidões multidisciplinares para lidar com os aspectos agrônômicos, tecnológicos e estatísticos da análise de dados.

Nos EUA, pude visitar a feira de tecnologias InfoAG (St. Louis, Missouri) em dois anos consecutivos, o que foi interessante para comparar as tecnologias apresentadas nos dois anos. Neste sentido, me chamou atenção a participação de duas empresas (uma americana e outra brasileira), ambas com tecnologias envolvendo sensores para análise de solo, que prometiam uma caracterização completa dos atributos de fertilidade. Ambas expuseram seus produtos em um ano, chamando bastante a atenção do público, mas no ano seguinte já não estavam mais lá. Isso me chamou a atenção, pois aparentemente essas empresas investem muito no desenvolvimento do mercado, antes de concretizarem o desenvolvimento do produto, gerando muita frustração no mercado.

Ainda nos EUA, pude visitar a empresa Veris Technologies, uma das pioneiras em desenvolver plataformas agrícolas com sensores de solo embarcados para coleta de dados *on-the-go*, onde fui recebido pelo proprietário da empresa Eric Lund. Conversando sobre as tecnologias da empresa e comparando suas aplicações no Brasil e EUA, o Eric chamou a atenção para a discrepância na quantidade de áreas mapeadas com sensor de CEa com a avaliação das correlações dela com os atributos de fertilidade em solos norte americanos e solos brasileiros. No Brasil, temos pouquíssimos solos mapeados em comparação aos EUA. Para ele, esse é um gargalo para o avanço do uso dessa tecnologia aqui. A empresa Veris tem sensores NIR, de pH e de umidade, todos operando de maneira *on-the-go*, e eles acreditam que o futuro é utilizar essa informação como um dado complementar as análises de laboratório para ajudar a entender o talhão como um todo, usando uma escala de coleta de dados mais fina (via sensor) e que seja calibrada pelo método tradicional que é mais acurado (análise de laboratório).

4.3. Brasil

Ao visitar diferentes laboratórios de análise de solo no Brasil, minha percepção é que temos uma pulverização muito grande de laboratórios (ou seja, vários laboratórios em diferentes cidades para atender a grande extensão do agro no país), porém com uma padronização de qualidade muito pequena. Apesar da existência dos ensaios de proficiência conduzidos por instituições consolidadas (e.g., Instituto Agrônomo de Campinas - IAC) e da ISO 17.025 do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) que busca a padronização dos procedimentos de análises, existe uma grande quantidade de laboratórios que não buscam essas padronizações para garantir a qualidade de suas análises. Isso ocorre muitas vezes porque grande parte desses laboratórios são pequenos e de baixa tecnologia. Ao compararmos essa realidade com os EUA, lá já houve uma percepção do produtor da necessidade de serviços de análise com melhor qualidade, o que forçou a organização do setor de laboratórios, existindo pouquíssimos laboratórios pequenos e/ou com baixa tecnologia aplicada para garantir qualidade.

Recentemente, um dos maiores laboratórios de análises agrícolas brasileiros divulgou a utilização de sensores para avaliação rápida e limpa de uma ampla gama de atributos físicos e químicos do solo. Esse equipamento chegou a ser lançado no mercado em um congresso de agricultura de precisão, mas algum tempo depois mudou-se a forma de divulgação do produto, diminuindo os atributos analisados para apenas textura e matéria orgânica do solo. De todos modos, parece que o produto não se concretizou no mercado com uma modernização da análise conforme prometido para os solos no Brasil. Uma percepção que dificulta a disseminação de sensores dentro de laboratórios é o alto custo desses equipamentos, que são todos importados e comercializados em dólares. Por exemplo, o preço de um equipamento vis-NIR para ser importado hoje no Brasil (início de 2022) está em torno de 90.000 dólares, um sensor XRF, por sua vez, tem preço oscilando entre 45.000 e 60.000 dólares.

Relacionada a agricultura de precisão no Brasil, observa-se uma grande concentração de serviços utilizando apenas amostragem de solo em grades amostrais para aplicação de fertilizantes em taxa variada, sendo na maioria das vezes essas grades apresentam baixa densidade espacial de amostras, o que pode ser um problema. Observa-se também alguma discussão na implementação de zona de manejo, mas com pouco consenso sobre a forma de recomendar um manejo otimizado para cada zona (ou seja, falta experimentação *on-farm* para subsidiar essa tomada de decisão). Conversando com o pessoal da área, acredita-se que os próximos anos será de avanços na integração de diferentes fontes de informação (e.g., satélite, mapas de produtividades, mapas de fertilidade, etc), viabilizando o desenvolvimento de bibliotecas com grandes quantidades de dados que permitam subsidiar a nível de fazenda a tomada de decisão para otimização do uso de insumos.

Conclusões

Estamos vivenciando uma expansão muito grande de disponibilidade de dados para o produtor rural, com expansão de técnicas (e.g., vários tipos de sensores) e abordagens (e.g., avanços na avaliação de saúde do solo), mas ainda não somos eficientes em simplificar essa informação de modo a torná-la útil para o produtor tomar e otimizar suas decisões no campo, o que é uma necessidade a ser suplantada com o avanço do conhecimento científico na área. Neste sentido, experimentações *on-farm*, vinculadas a tecnologias e abordagens de agricultura de precisão, podem ser uma alternativa interessante para preencher essa lacuna de informação.

De forma geral, a comunidade ligada a laboratórios de análises agrícolas tem grande interesse na aplicação de sensores para baratear o custo com análises e viabilizar análises robustas diretamente no campo. Contudo, a nível mundial essa aplicação não está madura o suficiente para ter consensos sobre os procedimentos corretos para isso ocorrer. O que existem são diferentes empresas e entidades conduzindo procedimentos distintos, buscando avaliar e viabilizar comercialmente tais processos. Em paralelo, algumas empresas acabam acelerando o marketing antes mesmo de ter o produto acabado, o que gera muita especulação sobre as tecnologias em si.

Ao comparar a evolução da cadeia de laboratórios de análises agrícolas fora do Brasil com a nacional, acredita-se que no Brasil a busca por qualidade de análise vinda do produtor/consultor levará laboratórios a se modernizarem e criar escalas maiores. Por sua vez, a utilização de sensores dentro dos laboratórios pode ser útil de fato, mas ainda carece do desenvolvimento de protocolos robustos que é algo a ser desenvolvido junto com a pesquisa científica, bem como na necessidade de subsídio para a viabilização da aquisição de sensores que têm preços altos e são importados e comercializados em dólar, algo que demanda um desenvolvimento político.

Recomendações

É necessário que produtores se envolvam cada vez mais com pesquisa e eventos científicos para não depender exclusivamente da iniciativa de projetos das Universidades. Isso traria um ganho tanto para o produtor que se adaptaria mais com testes e experimentação de campo em sua própria propriedade para adaptar recomendações generalizadas à sua realidade, quanto para o pesquisador que poderia conhecer melhor e focar em soluções para problemas reais;

De forma conectada com a primeira recomendação, recomendo/enfatizo que pesquisadores busquem entender mais os problemas e necessidades do campo, ou seja, que busquem fazer pesquisa aplicada com um contato maior com o produtor;

Aumentar a cooperação entre laboratórios para discutir questões comuns e promover desenvolvimento de novas tecnologias de forma cooperada para aumentar a profissionalização do setor;

Estimular instituições públicas e/ou privadas a buscarem parcerias e recursos (e.g., via fundações de amparo à pesquisa) para desenvolverem procedimentos e bibliotecas espectrais de solos usando dados de sensores (e.g., vis-NIR, MIR, XRF) para viabilizar a utilização e expansão dessas tecnologias que têm alto potencial de beneficiar toda a cadeia do agro (e.g., viabilizar equipamentos *easy-to-use* para produtores e revendas, embarcar sensores em robôs e/ou máquinas agrícolas, entre outros).

References

- Abbasi, A.Z, Islam, N., Shaikh, Z.A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Comput. Stand. Interfaces*, 36(2), 263-270, doi: 10.1016/j.csi.2011.03.004.
- Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Upadhyaya, S.K. (2004) On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 44(1): 71-91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>
- Adamchuk, V.I., Lund, E.D., Sethuramasamyraja, B., Morgan, M.T., Dobermann, A., Marx DB (2005) Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(3): 272-294. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.05.001>.
- Adamchuk VI, Viscarra Rossel R (2010) Development of on-the-go proximal soil sensor systems. In *Proximal soil sensing* 15-28p. Springer, Dordrecht.
- Andrade, R., Faria, W.M.; Silva, S.H.G.; Chakraborty, S.; Weindorf, D.C.; Mesquita, L.F.; Guilherme, L.R.G.; Curi, N. (2020). Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. *Geoderma*, 357, p.113960, doi: 10.1016/j.geoderma.2019.113960.
- Bacco, M.; Barsocchi, P.; Ferro, E.; Gotta, A.; Ruggeri, M. (2019). The digitisation of agriculture: a survey of research activities on smart farming. *Array*, 3, 100009, doi: 10.1016/j.array.2019.100009.
- Ben-Dor, E. (2002) Quantitative remote sensing of soil properties. *Advances in Agronomy*, 75: 173-244. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(02\)75005-0](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(02)75005-0).
- Castrignanò, A., Wong, M.T.F, Stelluti, M., Benedetto, D., Sollitto, D. (2012) Use of EMI, gamma-ray emission and GPS height as multi-sensor data for soil characterisation. *Geoderma*, 175: 78-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.013>.
- Christy, C.D. (2008) Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1): 10-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.02.010>.
- Corwin, D.L., Lesch, S.M. (2005) Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and electronics in agriculture*, 46(1-3): 11-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>.
- Demattê, J.A.M. (2002) Characterization and discrimination of soils by their reflected electromagnetic energy. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 37(10): 1445-1458. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X20020010000131016/j.geoderma.2018.09.010>.
- Demattê JAM, Morgan CLS, Chabrillat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra F, Wetterlind J (2016) Spectral sensing from ground to space in soil science: State of the art, applications, potential and perspectives. *Land Resources Monitoring, Modeling, and Mapping with Remote Sensing*. Thenkabail, PS, Ed, 661-732.

- Demattê, JAM.; Dotto, AC.; Bedin, LG.; Sayão, VM.; Souza, AB. (2019). Soil analytical quality control by traditional and spectroscopy techniques: Constructing the future of a hybrid laboratory for low environmental impact. *Geoderma*, 337, 111-121. doi: 10.1016/j.geoderma.2016.11.013.
- Demattê JA, Ramirez-Lopez L, Marques KPP, Rodella AA (2017) Chemometric soil analysis on the determination of specific bands for the detection of magnesium and potassium by spectroscopy. *Geoderma*, 288: 8-22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.013>.
- Dhawale NM, Adamchuk VI, Prasher SO, Viscarra Rossel RA, Ismail AA, Kaur J (2015) Proximal soil sensing of soil texture and organic matter with a prototype portable mid-infrared spectrometer. *European Journal of Soil Science*, 66(4): 661-669. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12265>.
- Dow AI, James DW (1973a) Intensive Soil Sampling: A Principle of Soil Fertility Management in Intensive Irrigation Agriculture. Washington Agricultural Experiment Station Bulletin 781. Washington State University, Pullman, WA.
- Dow AI, James DW, Russell TS (1973b) Soil Variability in Central Washington and Sampling for Soil Fertility Tests. Washington Agricultural Experiment Station Bulletin 788, Washington State University, Pullman, WA.
- Eitelwein MT, Trevisan RG, Colaço AF, Vargas MRI, Molin JP (2016) On-the-go measurements of pH in tropical soil, In Proceedings of the 13th International Conference on Precision Agriculture Monticello. In: International Society of Precision Agriculture.
- Ferreira EC, Neto JAG, Milori DM, Ferreira EJ, Anzano JM (2015) Laser-induced breakdown spectroscopy: Extending its application to soil pH measurements. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 110: 96-99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2015.06.002>
- Galuszka A, Migaszewski ZM, Namieśnik J (2015) Moving your laboratories to the field—Advantages and limitations of the use of field portable instruments in environmental sample analysis. *Environmental research*, 140: 593-603. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.05.017>.
- Gebbers R, Adamchuk VI (2010) Precision agriculture and food security. *Science* 327(5967): 828-831. DOI: 10.1126/science.1183899.
- Huang J, Lark RM, Robinson DA, Lebron I, Keith AM, Rawlins B, Tye A, Kuras O, Raines M, Triantafyllidis J (2014) Scope to predict soil properties at within-field scale from small samples using proximally sensed γ -ray spectrometer and EM induction data. *Geoderma*, 232: 69-80. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.031>.
- Hummel, JW, Gaultney, LD, Sudduth, KA (1996). Soil property sensing for site-specific crop management. *Comput. Electron. Agric.*, 14(2-3), 121-136, doi: 10.1016/0168-1699(95)00043-7.
- Janik LJ, Merry RH, Skjemstad JO (1998) Can mid infrared diffuse reflectance analysis replace soil extractions?. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 38(7): 681-696. DOI: <https://doi.org/10.1071/EA97144>.

- Ji W, Adamchuk VI, Biswas A, Dhawale NM, Sudarsan B, Zhang Y, Viscarra Rossel RA, Shi Z (2016) Assessment of soil properties in situ using a prototype portable MIR spectrometer in two agricultural fields. *Biosystems engineering*, 152: 14-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.005>.
- Kim HJ, Sudduth KA, Hummel JW (2009) Soil macronutrient sensing for precision agriculture. *Journal of Environmental Monitoring*, 11(10): 1810-1824. DOI: 10.1039/B906634A.
- Krug FJ, Rocha FRP (2016) Métodos de preparo de amostras para análise elementar. EditSBQ, Sociedade Brasileira de Química, São Paulo, 572p.
- Kuang B, Mahmood HS, Quraishi MZ, Hoogmoed WB, Mouazen AM, Henten, EJV (2012) Sensing soil properties in the laboratory, in situ, and on-line: a review. In: *Advances in Agronomy* 114, 155-223p. Academic Press.
- Lima, T.M., Weindorf, D.C., Curi, N., Guilherme, L.R., Lana, R.M. and Ribeiro, B.T. (2019) Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. *Geoderma*, 353, 264-272. doi: 10.1016/j.geoderma.2019.06.045.
- Machado PDA, Bernardi ADC, Valencia LIO, Molin JP, Gimenez LM, Silva CA, Meirelles MSP (2006) Mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41(6): 1023-1031.
- McBratney AB, Santos MM, Minasny B (2003) On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2): 3-52. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).
- Molin, J.P.; Gimenez, L.M.; Pauletti, V.; Schmidhalter, U.; Hammer, J. (2005). Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. *Engenharia Agrícola*, 25(2), 420-426.
- Molin JP, Castro CND (2008) Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. *Scientia Agricola*, 65(6): 567-573. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162008000600001>.
- Molin JP, Rabello LM (2011) Estudos sobre a mensuração da condutividade elétrica do solo. *Engenharia Agrícola*, 31(1): 90-101.
- Molin JP, Faulin GDC (2013) Spatial and temporal variability of soil electrical conductivity related to soil moisture. *Scientia Agricola*, 70(1): 01-05. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000100001>
- Molin, J.P.; Tavares, T.R. (2019). Sensor systems for mapping soil fertility attributes: challenges, advances, and perspectives in Brazilian tropical soils. *Engenharia Agrícola*, 39, pp.126-147, doi: 10.1590/1809-4430-eng.agric.v39nep126-147/2019.
- Mouazen AM, Kuang B (2016) On-line visible and near infrared spectroscopy for in-field phosphorous management. *Soil & Tillage Research*, 155: 471-477. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.04.003>.

- Mouazen AM, Maleki MR, Baerdemaeker J, Ramon H (2007) On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. *Soil Tillage Research*, 93(1): 13-27. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.009>.
- Mulla D, khosla R (2016) Historical Evolution and Recent Advances in Precision Farming. *Soil-Specific Farming Precision Agriculture*: 1-35.
- Nanni, M.R.; Demattê, J.A.M. (2016). Spectral reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 70, 393-407, doi: 10.2136/sssaj2003.0285.
- Nawar S, Corstanje R, Halcro G, Mulla D, Mouazen AM (2017) Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. In: *Advances in agronomy* 143: 175-245. Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.01.003>.
- O'Rourke SM, Stockmann, U, Holden NM, McBratney, AB, & Minasny B, (2016) An assessment of model averaging to improve predictive power of portable vis-NIR and XRF for the determination of agronomic soil properties. *Geoderma*, 279: 31-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.05.005>
- Reeves III JB (2010) Near-versus mid-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil analysis emphasizing carbon and laboratory versus on-site analysis: where are we and what needs to be done?. *Geoderma*, 158(1-2): 3-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.005>.
- Sanches GM, Magalhães PS, Remacre AZ, Franco HC (2018) Potential of apparent soil electrical conductivity to describe the soil pH and improve lime application in a clayey soil. *Soil and Tillage Research*, 175: 217-225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.09.010>.
- Santos, F.R.; Oliveira, J.F.; Bona, E.; Santos, J.V.F.; Barboza, G.M.; Melquiades, F.L. (2020). EDXRF spectral data combined with PLSR to determine some soil fertility indicators. *Microchem. J.*, 152, 104275, doi:10.1016/j.microc.2019.104275.
- Schirrmann M, Domsch H (2011) Sampling procedure simulating on-the-go sensing for soil nutrients. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 174(2): 333-343. DOI: <https://doi.org/10.1002/jpln.200900367>.
- Silva, S.H.G.; Teixeira, A.F.D.S.; Menezes, M.D.D.; Guilherme, L.R.G.; Moreira, F.M.D.S.; Curi, N. (2017). Multiple linear regression and random forest to predict and map soil properties using data from portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF). *Ciênc. Agrotec.*, 41, 648-664, doi: 10.1590/1413-70542017416010317.
- Silva, F.C.D.S.; Molin, J.P. (2018). On-the-go tropical soil sensing for pH determination using ion-selective electrodes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 53(11), 1189-1202, doi: 10.1590/s0100-204x2018001100001.
- Sinfield JV, Fagerman D, Colic O (2010) Evaluation of sensing technologies for on-the-go detection of macro-nutrients in cultivated soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 70(1): 1-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.09.017>.

- Stenberg B, Viscarra Rossel RA, Mouazen AM, Wetterlind J (2010) Visible and near-infrared spectroscopy in soil science. *Advances in Agronomy*, 107: 163-215. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)07005-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7).
- Sudduth KA, Kitchen NR, Wiebold WJ, Batchelor WD, Bollero GA, Bullock DG, Clay DE, Palm HL, Pierce, FJ, Schuler RT, Thelen KD (2005) Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north- central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1-3): 263-283. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010>.
- Tavares, T. R., Mouazen, A. M., Nunes, L. C., dos Santos, F. R., Melquiades, F. L., da Silva, T. R., ... & Molin, J. P. (2022). Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for tropical soil fertility analysis. *Soil and Tillage Research*, 216, 105250.
- Van Raij, B. (2011). *Fertilidade do Solo e Manejo de Nutrientes*; International Plant Nutrition Institute (IPNI): Piracicaba, São Paulo, Brazil; p. 420.
- Villas-Boas PR, Romano RA, Franco MAM Ferreira EC, Ferreira EJ, Crestana S, Milori DMBP (2016) Laser-induced breakdown spectroscopy to determine soil texture: A fast analytical technique. *Geoderma*, 263: 195-202. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.09.018>.
- Viscarra Rossel R, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, 131(1-2): 59-75. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>.
- Viscarra Rossel RA, Taylor HJ, McBratney, AB (2007) Multivariate calibration of hyperspectral γ-ray energy spectral for proximal soil sensing. *European Journal of Soil Science*, 58(1): 343-353. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00859.x>.
- Viscarra Rossel, RA.; Adamchuk, VI.; Sudduth, KA.; McKenzie, NJ.; Lobsey, C. (2011) Proximal soil sensing: an effective approach for soil measurements in space and time. *Advances in agronomy*, 113, 243-291.
- Viscarra Rossel RA, Bouma J (2016) Soil sensing: A new paradigm for agriculture. *Agricultural Systems*, 148: 71-74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001>
- Viscarra Rossel RA, Lobsey C (2016) Scoping review of proximal soil sensors for grain growing.
- Wetterlind J, Tourlière B, Martelet G, Deparis J, Saby NP, Forges ACR, Arrouays D (2012) Are there any effects of the agricultural use of chemical fertiliser on elements detected by airborne gamma-spectrometric surveys?. *Geoderma*, 173: 34-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.01.011>.
- Wolfert, S.; Ge, L.; Verdouw, C.; Bogaardt, M. J. (2017). Big data in smart farming—a review. *Agric. Syst.*, 153, 69-80, doi: 10.1016/j.agsy.2017.01.023.