

Núcleo Regional Leste
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Manejo do solo em sistemas integrados de produção

André Guarçoni Martins | Araújo Hulmann Batista | Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira | Wedisson Oliveira Santos
(Editores)



Núcleo Regional Leste
Sociedade Brasileira de Ciência do Solo

Manejo do solo em sistemas integrados de produção

André Guarçoni Martins | Araújo Hulmann Batista | Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira | Wedisson Oliveira Santos
(Editores)



Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

Gentilmente cedidas pela Dra. Margarida

Goréte Ferreira do Carmo (UFRRJ) – superior –

e Dr. Wanderlei Bieluczyk (CENA-USP) – inferior

(Foto de sistema de integração pecuária-floresta)

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Agrárias e Multidisciplinar

Prof. Dr. Alexandre Igor Azevedo Pereira – Instituto Federal Goiano

Profª Drª Amanda Vasconcelos Guimarães – Universidade Federal de Lavras

Profª Drª Andrezza Miguel da Silva – Universidade do Estado de Mato Grosso



Prof. Dr. Arinaldo Pereira da Silva – Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará
Prof. Dr. Antonio Pasqualetto – Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Profª Drª Carla Cristina Bauermann Brasil – Universidade Federal de Santa Maria
Prof. Dr. Cleberton Correia Santos – Universidade Federal da Grande Dourados
Profª Drª Diocléa Almeida Seabra Silva – Universidade Federal Rural da Amazônia
Prof. Dr. Écio Souza Diniz – Universidade Federal de Viçosa
Prof. Dr. Edevaldo de Castro Monteiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul
Prof. Dr. Fágner Cavalcante Patrocínio dos Santos – Universidade Federal do Ceará
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia
Prof. Dr. Guilherme Renato Gomes – Universidade Norte do Paraná
Prof. Dr. Jael Soares Batista – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Jayme Augusto Peres – Universidade Estadual do Centro-Oeste
Prof. Dr. Júlio César Ribeiro – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Profª Drª Lina Raquel Santos Araújo – Universidade Estadual do Ceará
Prof. Dr. Pedro Manuel Villa – Universidade Federal de Viçosa
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão
Prof. Dr. Renato Jaqueto Goes – Universidade Federal de Goiás
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará
Profª Drª Talita de Santos Matos – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Tiago da Silva Teófilo – Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas



Manejo do solo em sistemas integrados de produção

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Yaiddy Paola Martinez
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Araína Hulmann Batista
Wedisson Oliveira Santos
Organizadores: André Guarçoni Martins
Araína Hulmann Batista
Beno Wendling
Marcos Gervasio Pereira
Wedisson Oliveira Santos

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M274 Manejo do solo em sistemas integrados de produção / Organizadores André Guarçoni Martins, Araína Hulmann Batista, Beno Wendling, et al. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Outros organizadores
Marcos Gervasio Pereira
Wedisson Oliveira Santos

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-0445-3
DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.453222608>

1. Solos - Manejo. 2. Agricultura. I. Martins, André Guarçoni (Organizador). II. Batista, Araína Hulmann (Organizadora). III. Wendling, Beno (Organizador). IV. Título.
CDD 631.4

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br



Atena
Editora
Ano 2022

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



APOIO



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIAS DO SOLO



PREFÁCIO

O solo é a base para produção de alimentos, fibras, biocombustíveis e matérias-primas, e faz a conexão entre o clima e os ciclos biogeoquímicos, sustenta a biodiversidade, e desempenha papel importante na capacidade dos ecossistemas de fornecer serviços ambientais. Por isso, o manejo adequado do solo não deve ser negligenciado em qualquer empreendimento, seja em nível local, regional ou global.

Controlar a erosão do solo e a perda de água, intensificar a produção agrícola e mitigar as emissões de gases de efeito estufa devem ser hoje os objetivos da agricultura brasileira. Atualmente, cerca de 30% das terras do Brasil são utilizadas para agropecuária, e estima-se que mais de 35 milhões de ha sejam cultivados com sistemas plantio direto, e outros 17 milhões de ha com sistemas de integração. Para ampliar a adoção dos sistemas integrados, e dos princípios dos sistemas conservacionistas no Brasil é necessário unir a determinação dos agricultores, o conhecimento técnico e a elaboração de planos e políticas governamentais efetivas.

A agricultura brasileira avançou muito na busca da sustentabilidade ao desenvolver e implementar práticas como a fixação biológica de N, o controle biológico, o plantio direto, e os sistemas integrados. Neste aspecto, destaca-se o Plano Agricultura de Baixo Carbono (ABC), que tem por objetivo a adoção de tecnologias de produção sustentáveis para redução de emissão de gases de efeito estufa no setor agropecuário brasileiro. A primeira etapa teve início em 2010 e terminou em 2020, e a segunda etapa, chamada de Plano ABC+ prevê redução da emissão de 1,1 bilhão de toneladas de carbono equivalente (CO₂eq) até 2030, com adoção de práticas sustentáveis em mais de 72 milhões de hectares nos sistemas de produção agropecuários. Dentre estas práticas estão o sistema plantio direto (12,5 milhões de ha), sistemas integrados (10 milhões de ha), e a recuperação de pastagens degradadas (30 milhões de ha), entre outras tecnologias.

Os sistemas integrados de produção são estratégias de uso sustentável da terra, que podem apoiar o aumento da produção agrícola, e ao mesmo tempo recuperar e preservar o meio ambiente. A publicação “Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção” propõe fornecer informações à sociedade, aos técnicos, aos produtores e aos tomadores de decisão sobre a eficácia da adoção dos princípios da agricultura conservacionista, em especial os sistemas integrados, para combater a erosão do solo, o principal agente de degradação da terra e perda de produtividade. Os capítulos foram elaborados após profunda e abrangente revisão de literatura, e trazem os principais resultados e inovação alcançados pela pesquisa na área da Ciências do Solo com foco nos sistemas integrados.

O manejo conservacionista é chave para manter os solos saudáveis por meio de combinação de práticas e técnicas de manejo mais adequadas. Os indivíduos comprometidos

com a conservação do solo auxiliam para garantir que o solo seja fértil e produtivo, o protegem da erosão e degradação, e ajudam a aumentar a resiliência do ecossistema diante das mudanças climáticas. Daí a importância desse livro, que sintetiza o conhecimento científico sobre o impacto positivo dos sistemas conservacionistas, ao abordar temas como plantio direto, manejo do solo e da fertilidade, uso de resíduos, e monitoramento e diagnóstico de sistemas integrados, agroecológicos, orgânicos e agricultura familiar em ambientes distintos como Cerrado, montanha, mar de morros e tabuleiros costeiros. Dessa forma, esta obra torna-se essencial para superar os desafios, e direcionar esforços e conhecimentos para alcançar a sustentabilidade da produção agropecuária.

Considero um grande privilégio apresentar o livro “Manejo do Solo em Sistemas Integrados de Produção” neste momento crucial da agricultura brasileira. Parablenizo os Editores e todos os Autores deste importante livro, e estimo a todos os interessados a unirem esforços, conhecimentos e recursos em direção ao futuro da agricultura sustentável, e que tem nos Sistemas Integrados a ferramenta fundamental.

Alberto C. de Campos Bernardi

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
O ESTADO DA ARTE DO SISTEMA PLANTIO DIRETO NO CERRADO	
ADOÇÃO, DISSEMINAÇÃO E DESAFIOS DO SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	2
Agricultura conservacionista.....	2
Plantio Direto (PD) e Sistema Plantio Direto (SPD).....	3
Expansão do sistema plantio direto no país.....	4
Os desafios enfrentados pelo sistema plantio direto.....	6
<i>No Brasil</i>	6
<i>No Cerrado, sob condições naturais de cultivo</i>	9
Produção de massa fresca e seca.....	9
Decomposição dos resíduos e ciclagem de nutrientes.....	11
<i>No Cerrado, sob áreas irrigadas</i>	14
Produção de massa fresca e seca.....	14
Decomposição dos resíduos e ciclagem de nutrientes.....	15
BENEFÍCIOS E IMPACTOS DO SISTEMA PLANTIO DIRETO AO AMBIENTE EDÁFICO	17
Melhorias nos atributos físicos.....	17
Melhorias nos atributos químicos.....	18
Aumento da biodiversidade do solo.....	20
Melhoria na qualidade nutricional das plantas.....	22
Controle populacional de fitonematoides.....	26
CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS	28
INTRODUÇÃO	38
CAPÍTULO 2	38
SOLOS DO CERRADO MINEIRO: POTENCIAIS DE USO E FRAGILIDADES AMBIENTAIS	
OS SOLOS DO CERRADO MINEIRO	41
Neossolos Litólicos e Regolíticos com cerrado rupestre (I).....	41
Solos arenosos (II).....	43
Chapadões com Latossolos argilosos (III).....	45
Solos de rochas pelíticas (IV).....	47

Chapadas a Leste (V)	50
Solos de textura média (VI).....	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
REFERÊNCIAS	57
INTRODUÇÃO	61
CAPÍTULO 3.....	61
SOLOS E SISTEMAS DE USO E MANEJO EM AMBIENTES DE MONTANHA, MAR DE MORROS E TABULEIROS COSTEIROS	
REVISÃO DE LITERATURA.....	62
Ambientes de Montanha	62
Ambiente de Mar de Morros.....	70
Tabuleiros Costeiros	74
<i>Conservação e manejo integrado nos diferentes ambientes</i>	<i>76</i>
CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
REFERÊNCIAS	78
INTRODUÇÃO	80
CAPÍTULO 4.....	80
MANEJO DO SOLO PARA A SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA	
REVISÃO DE LITERATURA.....	82
Particularidades no manejo do solo frente à intensificação da produção agropecuária	82
<i>Amostragem de solo</i>	<i>82</i>
<i>Práticas conservacionistas de manejo</i>	<i>85</i>
<i>Intercalando a lavoura e a pecuária</i>	<i>87</i>
<i>A inserção da árvore no sistema de integração</i>	<i>91</i>
<i>Potencial funcional no solo e o manejo da biodiversidade na prática.....</i>	<i>95</i>
<i>Como a presença do animal pode modificar a qualidade do solo?</i>	<i>98</i>
Adubação de sistemas e manejo da qualidade do solo.....	101
<i>Ciclagem de nutrientes e adubação de sistemas.....</i>	<i>101</i>
<i>A atividade enzimática do solo favorecendo a eficiência do uso de fertilizantes</i>	<i>105</i>
Manejo do solo e os reflexos em sustentabilidade nos sistemas integrados	107

Sistemas integrados como ferramenta essencial para o Brasil cumprir com os acordos internacionais sobre o clima..... 111

CONSIDERAÇÕES FINAIS 113

REFERÊNCIAS 114

INTRODUÇÃO 129

CAPÍTULO 5..... **129**

MANEJO DO SOLO EM SISTEMAS AGROECOLÓGICOS E AGRICULTURA FAMILIAR

REVISÃO DE LITERATURA..... 131

 Agroecologia e Agricultura Familiar 131

 Manejo ecológico do solo 135

 Manejo do solo em sistemas agroecológicos 138

CONSIDERAÇÕES FINAIS 144

REFERÊNCIAS 145

INTRODUÇÃO 153

CAPÍTULO 6..... **153**

MANEJO DA FERTILIDADE DO SOLO EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO

REVISÃO DE LITERATURA..... 154

 Dinâmica da acidez do solo em sistemas integrados 154

 Manejo da calagem em sistemas integrados..... 157

 Dinâmica do nitrogênio no solo em sistemas integrados..... 159

 Manejo da adubação nitrogenada em sistemas integrados 162

 Dinâmica do fósforo e do potássio no solo em sistemas integrados 166

 Manejo da adubação fosfatada e potássica em sistemas integrados 169

 Dinâmica de outros nutrientes no solo e manejo de suas adubações..... 175

CONSIDERAÇÕES FINAIS 178

REFERÊNCIAS 179

INTRODUÇÃO 189

 Agricultura tropical, capim e saúde do solo 189

CAPÍTULO 7.....	189
SAÚDE DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA	
REVISÃO DE LITERATURA.....	191
Bioindicadores para avaliar a saúde e acessar a memória solo	191
Biofuncionamento do solo em sistemas integrados (ILP)	195
Braquiária: um excelente biocondicionador de solo	201
Saúde do solo em sistemas ILP: mais resiliência, mais biorremediação, mais ciclagem e menos emissões.	206
Bioanálise de solo (BioAS): Uma nova aliada para avaliar a saúde dos solos tropicais	210
Índices de qualidade de solo: integrando qualidade biológica e fertilidade do solo em áreas sob sistemas ILP	213
CONSIDERAÇÕES FINAIS	218
AGRADECIMENTOS	219
REFERÊNCIAS	219
INTRODUÇÃO	224
CAPÍTULO 8.....	224
USO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS NA AGRICULTURA	
REVISÃO DE LITERATURA.....	225
Origem dos resíduos orgânicos na agricultura	225
<i>Resíduos orgânicos de origem animal</i>	227
<i>Resíduos orgânicos de origem vegetal</i>	229
<i>Resíduos orgânicos agroindustriais</i>	230
Atributos químicos, físicos e biológicos do solo.....	232
Aspectos ambientais do uso de resíduos orgânicos na agricultura	234
Resíduos orgânicos e a sanidade de plantas	237
Resíduos orgânicos para produção de biochar: efeitos em atributos edáficos	244
CONSIDERAÇÕES FINAIS	248
REFERÊNCIAS.....	248
INTRODUÇÃO	265
CAPÍTULO 9.....	265
INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NO MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DA DEGRADAÇÃO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA EM SISTEMAS INTEGRADOS	

DE PRODUÇÃO

REVISÃO DE LITERATURA.....	267
Sistemas integrados de produção agropecuária.....	267
Degradação e conservação do solo e da água.....	270
Coleta de dados em escala espacial e temporal	272
Inovações no monitoramento e diagnóstico da conservação do solo e da água em sistemas integrados de produção	273
<i>Modelagem da erosão hídrica.....</i>	<i>273</i>
<i>Inteligência artificial.....</i>	<i>276</i>
<i>Visão computacional</i>	<i>278</i>
<i>Técnicas de rastreamento físico e químico.....</i>	<i>278</i>
<i>Sensores embarcados em veículo aéreo não-tripulado ou robôs.....</i>	<i>279</i>
<i>Aplicações de equipamento portátil de fluorescência de raios-x (pXRF).....</i>	<i>291</i>
CONSIDERAÇÕES FINAIS	294
AGRADECIMENTOS	295
REFERÊNCIAS.....	295
INTRODUÇÃO	307
CAPÍTULO 10.....	307
PRODUÇÃO ORGÂNICA DE HORTALIÇAS EM SISTEMA CONVENCIONAL DE PREPARO DO SOLO E PLANTIO DIRETO NA BAIXADA FLUMINENSE, RJ	
CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DESENVOLVIDO	309
CRONOLOGIA DAS ATIVIDADES DESENVOLVIDAS	309
Descrição da Área Experimental e Informações Gerais	309
Cultivo de Aveia Preta para Produção de Palhada (Maio a Outubro de 2018).....	310
Cultivo de Milho Verde (novembro de 2018 a fevereiro de 2019).....	312
Cultivo de Diferentes Plantas de Cobertura do Solo (fevereiro até junho de 2019)	315
Cultivo de Repolho (Junho até Setembro de 2019)	317
Cultivo de Diferentes Plantas de Cobertura do Solo (Dezembro de 2019 até Março de 2020)	320
Cultivo de Jiló (março até setembro de 2020)	323
Avaliação de atributos químicos, físicos e carbono orgânico total do solo após 3 ciclos de cultivo de plantas de cobertura do solo, seguidos de cultivos de hortaliças.....	326

DESAFIOS A SEREM SUPERADOS	336
CONSIDERAÇÕES FINAIS	336
REFERÊNCIAS	337
SOBRE OS ORGANIZADORES	339
SOBRE OS AUTORES	340

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NO MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DA DEGRADAÇÃO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA EM SISTEMAS INTEGRADOS DE PRODUÇÃO

Marx Leandro Naves Silva

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, MG. E-mail: marx@ufla.br.

Nilton Curi

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, MG. E-mail: niltcuri@ufla.br.

Bernardo Moreira Cândido

Instituto Agronômico de Campinas, Centro de Solos e Recursos Ambientais, Campinas, SP. E-mail: bernardocandido@gmail.com.

Bruno Teixeira Ribeiro

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, MG. E-mail: brunoribeiro@ufla.br

Bruno Montoani Silva

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, MG. E-mail: brunom.silva@ufla.br.

Junior Cesar Avanzi

Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Lavras, MG. E-mail: junior.avanzi@ufla.br.

1. INTRODUÇÃO

O homem é frequentemente responsável por causar danos ao ambiente, notadamente, no solo e na água. Quando se realiza uma atividade agronômica, deve-se estar ciente de que ela pode trazer impactos negativos ao ambiente, sendo necessárias medidas de prevenção, monitoramento, controle e/ou recuperação. O solo é responsável pela ciclagem de elementos

químicos, haja vista que sequestra carbono, regula o ciclo hidrológico e é um suporte da biodiversidade da fauna e da flora, entre outras funções ambientais.

O recurso natural solo está em constante interação com a litosfera, hidrosfera, biosfera e atmosfera. Em decorrência destas relações, a degradação do solo é um dos componentes de risco para a manutenção da vida no planeta. Os processos de degradação, entretanto, precisam ser diagnosticados a tempo de serem interrompidos e recuperados. Deste modo, em sistemas integrados de produção, as técnicas inovadoras de monitoramento e de diagnóstico da degradação e conservação do solo e da água são de grande importância para a sustentabilidade dos solos agrícolas.

No mundo, a agricultura se tornou cada vez mais especializada, com benefícios voltados à produção e acessibilidade de alimentos. Ao mesmo tempo, a produção agrícola especializada e a monocultura têm levantado preocupações com relação ao bem-estar animal, à degradação ambiental e perda da biodiversidade. Uma alternativa à agricultura convencional é a integração de culturas e animais no contexto agropecuário. A agricultura integrada de lavouras, florestas e pecuária pode melhorar a qualidade do solo, aumentar a produção sustentável, produzir uma diversidade maior de alimentos, melhorando a eficiência do uso da terra (FAO, 2010).

No entanto, a agricultura e a agropecuária nunca estão isentas de desafios, haja vista que os produtores frequentemente necessitam de informações especializadas em agricultura, criação de animais, diversidade genética, infraestrutura de processamento de produtos de origem animal etc. Estes aspectos foram abordados por Hilimire (2011) em sua revisão sobre sistemas integrados de produção nos EUA.

Estudos conduzidos por Franzluebbbers et al. (2014) sobre os impactos agrônômicos e ambientais dos sistemas integrados agrícolas e de pastagens na América do Norte e do Sul, indicaram que a agricultura se tornou cada vez mais especializada em resposta às pressões políticas, reguladoras, sociológicas e econômicas, buscando atender às demandas de um mercado cada vez maior do setor de processamento de alimentos e fibras. No entanto, há uma preocupação crescente com sistemas agrícolas especializados, devido aos impactos potencialmente negativos ao ambiente, à redução da qualidade do solo, à eutrofização dos corpos d'água, ao aumento das emissões de gases de efeito estufa e às perdas de solo, água, nutrientes e carbono orgânico. Os mesmos autores realizaram uma revisão sobre os sistemas integrados de produção na América do Norte e do Sul e realçaram os seguintes aspectos: (1) substanciais ganhos na produtividade de culturas agrícolas quando cultivadas após pastagens; (2) aumento do teor de matéria orgânica do solo relacionado às pastagens perenes; (3) melhoria na infiltração de água no solo com conseqüente redução na perda de solo e água; e (4) ganhos sinérgicos, entre os sistemas de cultivo e pecuária, no tocante à produtividade sustentável e ao ambiente.

Trabalhos conduzidos, envolvendo sistemas integrados de produção agropecuária sustentável sob sequeiro e irrigação por Blanco-Canqui et al. (2016) nos EUA, apontaram efeito benéfico dos resíduos de milho (*Zea mays* L.) nas pastagens subsequentes e na redução das perdas de solo.

Na China, estudos desenvolvidos por Dai et al. (2018) indicaram que a expansão das áreas de plantios agrícolas, em todo o mundo, tem levantado preocupações sobre sua capacidade de oferecer suporte a vários serviços ecossistêmicos. Foram avaliados cinco tipos de ecossistemas e serviços (produção de madeira, provisão de água, armazenamento de carbono, conservação do solo e retenção de água) fornecidos por florestas plantadas e naturais. Os resultados mostraram que os benefícios gerais dos serviços ecossistêmicos foram mais altos em cultivos mistos, seguidos por plantações de coníferas e de folhas largas. Além disso, a proteção das florestas naturais foi realçada. Estudos semelhantes conduzidos por Saad et al. (2018), utilizando os modelos *Universal Soil Loss Equation* (USLE) e InVEST, evidenciaram que trabalhos futuros devem considerar as estratégias de restauração da vegetação nas áreas de recarga de água, os sistemas de manejo conservacionista e a biodiversidade na agropecuária.

O monitoramento, diagnóstico, dimensionamento e a simulação de cenários dos processos de degradação do solo são fundamentais na gestão agropecuária moderna. O

principal enfoque nesta linha, refere-se à melhoria da eficiência desses procedimentos, aprimorando sua acurácia e agilidade, através de conceitos e tecnologias inovadores, notadamente nos sistemas integrados de produção agrícola. Ao longo dos anos, a versatilidade, a acurácia e a facilidade de acesso oferecidas pelos softwares e pelos sistemas gerenciados por eles, têm conduzido a uma aceitação crescente pela comunidade científica e técnica. Novos sistemas baseados em sensores próximos, robótica, modelagem, inteligência artificial, transmissão de dados via internet e outras tecnologias têm se mostrado capazes de reduzir a dependência atual da agricultura à produtos químicos, melhorar sua sustentabilidade, reduzir o impacto ambiental e otimizar seu gerenciamento (Saiz-Rubio e Rovina-Más, 2020). Para isso, os profissionais envolvidos devem trabalhar em grupos de pesquisa multidisciplinares e acompanhar a rápida evolução destas tecnologias (Lopes e Steidle Neto, 2011).

Portanto, pretende-se neste capítulo abordar o potencial das inovações tecnológicas de monitoramento e diagnóstico da degradação e conservação do solo e da água nos sistemas integrados de produção agropecuária.

2 . REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sistemas integrados de produção agropecuária

Os sistemas integrados de produção agropecuária visam explorar sinergismos e propriedades emergentes, frutos de interações nos compartimentos solo-planta-animal-atmosfera de áreas que integram atividades de produção florestal, agrícola e pecuária (Moraes et al., 2012). No Brasil, os sistemas mais difundidos de integração lavoura-pecuária envolvem associações de pecuária de corte ou leite (bovinos, ovinos e caprinos) com cultivos agrícolas (soja, feijão, milho, arroz, trigo, algodão, cana de açúcar e mamona) e florestais (eucalipto, pinus, seringueira e acácia), dentre outros, normalmente em larga escala. São interações planejadas em diferentes escalas espaço- temporais, abrangendo a exploração de produtos agrícolas (frutas, grãos, madeira, fibra, combustível, óleos, resinas etc.) e animais (ruminantes e monogástricos) na mesma área, de forma concomitante ou sequencial, e mesmo entre áreas distintas (Anghinoni et al., 2013), na Figura 1 observa-se o sinergismo e os benefícios dos sistemas integrados de produção.



Figura 1. Sinergismo no ciclo dos sistemas integrados de produção na agricultura, pecuária e floresta e as vantagens, como a otimização de nutrientes, os resíduos dos sistemas e a conservação do solo. Fonte: elaborado pelos autores.

Os sistemas integrados de produção agropecuária apresentam diferentes possibilidades de cultivos consorciados, em rotação ou em sucessão no espaço e no tempo. Crusciol et al. (2018) produziram uma revisão sobre o consórcio de lavouras graníferas com forrageiras perenes tropicais, considerados sistemas integrados simples. Estudos conduzidos por Lima et al. (2014; 2018) concluíram que o plantio do milho solteiro apresentou menor índice de cobertura vegetal, seguido do cultivo de feijão-de-porco solteiro e do consórcio entre as duas espécies vegetais. O consórcio entre as espécies apresentou maior potencial no controle de processos erosivos, uma vez que seu cultivo resulta em menores perdas de solo, se comparado ao cultivo solteiro das espécies estudadas. Esse aspecto é de grande importância para os pequenos e médios agricultores. A integração de florestas e lavouras e, ou, pastagens (incluindo animais) têm sido reconhecida como forma de uso das terras visando melhorias sociais e econômicas e sustentabilidade ambiental dos sistemas de produção (Porfírio da Silva, 2018). Segundo Soares et al. (2018), a combinação do componente animal, sobre pastagens com produção agrícola, representa uma oportunidade de gerar renda e promover benefícios agrícolas e ambientais em relação aos sistemas tradicionais. Além disso, otimiza os fatores bióticos (plantas e animais) e abióticos (água, nutrientes, radiação solar e temperatura) de produção, aumentando assim a produtividade sustentável e a rentabilidade das terras.

Os sistemas integrados de produção agropecuária têm a capacidade de prover

diversificação aos sistemas produtivos, o que, aliada às boas práticas agropecuárias e à agricultura conservacionista, resulta em um sistema único de suplantação do dilema produção *versus* conservação. Os desafios atuais de sua implantação estão na complexidade estrutural do sistema cujo requerimento de conhecimento técnico, econômico, entre outros, são muito mais elevados, comparados com os sistemas isolados. As condições edafoclimáticas do Brasil permitem ampla diversificação de sistemas produtivos, com variados arranjos espaço-temporais (Moraes et al., 2018), conforme pode ser observado na Figura 2.

Atualmente, as ações de conservação do solo e da água consideram o ecossistema agrícola não apenas como provedor de alimentos e fibras para geração sustentável de renda ao produtor e segurança alimentar, mas também como provedor de serviços ambientais (Balbino et al., 2019). Segundo os mesmos autores, os sistemas integrados aliados à semeadura direta são, potencialmente, as principais estratégias de produção agropecuária sustentável, em particular nos trópicos. No Brasil, verifica-se um proeminente avanço das tecnologias que compõem os diferentes sistemas, suas modalidades e seus arranjos de integração com inúmeros benefícios tecnológicos, econômicos, sociais, ecológicos e ambientais.



Figura 2. Demonstração da variabilidade no tempo e no espaço, biodiversidade e os arranjos complexos dos sistemas integrados de produção. Fonte: elaborado pelos autores.

2.2 Degradação e conservação do solo e da água

A degradação do solo pode ser química, física ou biológica. A principal forma de degradação do solo no Brasil é a física, destacando-se a erosão hídrica. Esta engloba o desprendimento e arraste das partículas do solo pela água por meio de chuvas erosivas, podendo causar erosão laminar, em sulcos, voçorocas, deslocamentos de massa, túneis, pináculos e pedestais. Para formar 10cm de solo, estima-se que sejam necessários cerca de dois mil anos (Oldeman, 1994; Brasília, 2015), o que justifica a preocupação acerca de que o uso e manejo incorretos do solo podem causar danos permanentes. Neste contexto, perdas da ordem de 5 a 7 milhões de hectares têm sido registradas anualmente no Brasil. Estimativas indicam que cerca de metade dos solos férteis do planeta teriam sido perdidos nos últimos 150 anos (Brasília, 2015).

O solo é um recurso natural lentamente renovável e essencial para a manutenção do ser humano e dos ecossistemas naturais, garantindo alimento, energia e quantidade/qualidade da água. O uso e manejo indiscriminados do solo causam sua degradação, com efeitos econômicos e sociais negativos para as gerações presentes e futuras. Atualmente, aproximadamente 800 milhões de pessoas estão em situação de insegurança alimentar ao redor do mundo (Lal, 2013) e 2 bilhões têm acesso restrito à água (World Health Organization e UNICEF, 2015; Paul Obade e Lal, 2016). Além disso, a população mundial deverá atingir 9,1 bilhões de pessoas em 2050 e, conseqüentemente, a demanda por alimentos também crescerá drasticamente (Alexandratos e Bruinsma, 2012).

Considerando que cerca de 50% da superfície terrestre é dedicada à agricultura e mais de 99,7% da alimentação humana provém da terra (Pimentel, 2006), o solo é um fator chave para a segurança alimentar das futuras gerações. Assim, o entendimento dos fatores que causam a sua degradação, bem como o monitoramento respectivo, é essencial para a correta implementação de estratégias que visem à recuperação e conservação dos ecossistemas e ambientes agrícolas.

Grandes volumes de água deixam de infiltrar naturalmente nos solos, em decorrência da redução da cobertura vegetal e do uso e manejo incorretos do solo. Milhares de cursos d'água têm se tornados secos devido às alterações do ciclo hidrológico e do nível do lençol freático, situação nitidamente agravada na última década no Brasil (Silva e Curi, 2001). Este déficit, aliado à ampliação das demandas de consumo de água, tem provocado colapso no sistema de abastecimento de água em vários municípios brasileiros. Outro aspecto é que os sedimentos provenientes da erosão hídrica podem conter concentrações substanciais de sementes, insumos e defensivos agrícolas, desencadeando processos de poluição de cursos de água. O material erodido é carregado para corpos de água superficiais ou subterrâneos, provocando o assoreamento de várzeas, rios, e reservatórios naturais ou artificiais. Isso diminui a disponibilidade de água para o ecossistema, consumo humano, produção de energia e sistemas integrados de produção agrícola. Em várias regiões do

Brasil, a falta d'água potável já é um problema grave, podendo ser considerado também um grande desastre ambiental (Silva e Curi, 2001).

Vários estudos têm comprovado vantagens dos sistemas agrícolas diversificados, entre estes, pode ser citado o estudo conduzido por Lima et al. (2018), em parcelas-padrão de perdas de solo e água para a cultura do milho em consórcio com plantas de cobertura, onde foram registradas menores perdas por erosão hídrica. Trabalho com resultados semelhantes foi conduzido por Beniaich (2018) e Beniaich et al. (2020) para a cultura da oliveira em consórcio com plantas de cobertura. Estudos englobam perdas de solos para o Brasil, utilizando parcelas-padrão e USLE, conduzidos por Anache et al. (2017) e Silva et al. (2019c), observaram que as menores perdas de solo por erosão ocorreram nos sistemas integrados de produção agropecuária.

Estudos conduzidos por Neves et al. (2007), em sistemas integrados de produção, indicaram que o manejo imposto ao solo para implementação do sistema integrado agricultura-floresta-pastagem afetou os atributos físicos e o carbono orgânico total do solo em relação ao Cerrado nativo, notadamente na camada mais superficial (0-5 cm). A densidade do solo, o volume total de poros, a microporosidade, macroporosidade e estabilidade de agregados, embora tendo sido afetados, apresentaram valores dentro da faixa considerada não restritiva ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. No geral, houve indicação de melhoria na qualidade do solo, no tocante à vulnerabilidade, à erosão hídrica nos sistemas integrados, quando comparados aos sistemas convencionais de uso e manejo do solo.

Estudos de qualidade do solo são importantes para o entendimento de sua interação com o ecossistema como um todo. Nesse contexto, estudos conduzidos por Neves et al. (2009), em sistemas integrados de produção, indicaram que microrganismos do solo desempenham papel fundamental para manutenção e produtividade de vários agroecossistemas. Com o aumento do tempo de implantação do sistema integrado de produção, houve uma recuperação do carbono da biomassa microbiana. Freire et al. (2012) concluíram que os sistemas convencionais de manejo de pastagens, florestas de eucalipto e culturas da soja e arroz sofreram reduções no índice de qualidade do solo quando comparados aos sistemas de referência (florestas nativas), sendo que apenas os sistemas integrados de produção, considerando as mesmas culturas citadas acima, apresentaram valores superiores de qualidade do solo quando comparados aos sistemas de referência. Estes estudos corroboram, com observações de Freitas et al. (2013), sobre a qualidade do solo em sistemas de manejo do solo no cerrado.

Entre as medidas conservacionistas de controle e recuperação, destacam-se: a) a recuperação das matas ciliares, matas de galeria, dos topos de morros, das várzeas e veredas; b) o fomento e a implementação de práticas de conservação do solo e da água, como o plantio em nível e terraceamento (Silva et al., 2017; Cucchiari et al., 2020) e as

bacias de captação de água; c) a adoção do plantio direto; d) o manejo sustentável das pastagens e) a priorização de recomposição da reserva florestal legal para as classes de solos com indicação de uso menos intensivo (Silva et al., 2013) o estímulo e os subsídios à recuperação de áreas degradadas e à conservação do solo em áreas de recarga de água; e , por último, g) a introdução dos sistemas integrados de produção na agricultura, pecuária e silvicultura. O monitoramento da qualidade do solo, em sistemas de manejo através de tecnologias de instrumentação inovadoras, apresenta grande potencial modulador dos conceitos de sustentabilidade (Freitas et al., 2012; Lima et al., 2016).

No campo social, uma grande inovação na gestão do solo é a possibilidade de pagamento por serviços ambientais ou serviços ecossistêmicos, constituindo uma tendência mundial atual. Esse mecanismo tem como diferencial o incentivo aos agricultores, para que exerçam o papel de protetores dos recursos naturais, solo e água, eliminando ou minimizando os principais problemas relacionados com o uso e manejo incorretos do solo, buscando os sistemas conservacionistas e a biodiversidade (Avanzi et al., 2011; Saad et al., 2018; Saad et al., 2021).

2.3 Coleta de dados em escala espacial e temporal

Considerando a complexidade e dinâmica dos processos nos sistemas integrados de produção, pesquisadores e técnicos têm notado, cada vez mais, que as diversas facetas dos sistemas de produção agrícola não podem ser tratadas de maneira homogênea no que diz respeito à medição dos atributos de solo nas áreas agrícolas. Neste contexto, as **variações** espacial e temporal devem ser consideradas (Figura 2) para que se possa ter um melhor aproveitamento e sinergismo dos arranjos projetados nestes sistemas, o que está de acordo com dados de Farias et al. (2003).

Na conservação do solo e da água, há uma demanda crescente por dados de solos, em diferentes escalas espaciais e temporais, para se chegar a resultados de diagnóstico, monitoramento e controle dos problemas, de modo mais robusto e exato, notadamente nos sistemas integrados de produção agropecuária. Em uma escala espacial e temporal referente às diferentes condições que um determinado solo, sob sistemas de produção, a variabilidade de dados de solo pode apresentar em termos de atributos relacionados (no caso específico da conservação do solo): infiltração de água, compactação, erosão hídrica, estoque de carbono, ciclagem e perdas de nutrientes entre outros quesitos relevantes à sustentabilidade, sejam eles espaciais – quando se avalia as variações dos atributos de solo dentro da área de cultivo – ou temporais – quando se avalia as variações dos atributos de solo em relação ao tempo de cultivo.

A variabilidade dos atributos de solo, sob sistemas envolvendo plantas cultivadas, apresenta três categorias: espacial, temporal e preditiva. A variabilidade espacial é observada ao longo da área de plantio e pode ser facilmente constatada em mapas temáticos de atributos do solo. Já a variabilidade temporal é vista quando se comparam

mapas temáticos de atributos de solo em vários anos e a variabilidade preditiva consiste na diferença entre a previsão de algum atributo de solo e o que realmente ocorreu, sendo necessário entendê-las e, sobretudo, mensurá-las (Blackmore e Larsdcheid, 1997).

Nos sistemas integrados de produção, as análises em escalas espaciais, temporais e preditivas são de grande importância pelas características destes sistemas, os quais tendem a utilizar extensas áreas e longos períodos de consórcio, sucessão e, ou, rotação das plantas e animais envolvidos. O uso de metodologias e instrumentação inovadoras apresenta alto potencial para otimizar a obtenção de dados espaciais, temporais e preditivos, auxiliando nas tomadas de decisão em tempo real.

2.4 Inovações no monitoramento e diagnóstico da conservação do solo e da água em sistemas integrados de produção

2.4.1 Modelagem da erosão hídrica

Entre os vários modelos de predição de erosão, destacam-se como mais estudados no Brasil, a *Universal Soil Loss Equation* (USLE), modelo empírico, e sua versão revisada, a *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE). Os modelos apresentam grande potencial para estimativa de cenários de perdas de solo, nos sistemas integrados de produção. O grande desafio reside na validação dos modelos (Batista et al., 2019), para os vários ambientes e na geração de dados de campo para modelos que apresentam versões que estimam perdas de solo, água, nutrientes, carbono orgânico, elementos poluidores e o custo da erosão, com abrangência temporal e espacial, adaptados e, ou, desenvolvidos para o Brasil.

Utilizando o modelo USLE, estudos de modelagem da erosão hídrica têm sido desenvolvidos por vários autores (Oliveira et al., 2012; Avanzi et al., 2013; Oliveira et al., 2013b; Silva et al., 2014b; Silva et al., 2016), visando estudar a erosão hídrica em escala de sub-bacias hidrográficas de referência com florestas plantadas de eucalipto, identificando áreas críticas com relação à erosão hídrica e embasando a adoção de práticas conservacionistas e tomadas de decisão sobre o manejo do solo, como por exemplo, o plantio em covas, os sulcos, o plantio direto, em nível ou aproximadamente em nível, e o destino dos restos culturais ao final do ciclo do eucalipto. O uso desses modelos pode ser muito útil na previsão e no monitoramento de eventos erosivos extremos, subsidiando medidas de manejo conservacionista a serem implementadas (Batista et al., 2017). Os modelos de predição da erosão hídrica também apresentam grande potencial para serem utilizados na previsão de cenários futuros nos sistemas integrados de produção.

Na pesquisa de erosão hídrica é indispensável se conhecer as características básicas da precipitação e da enxurrada e seu potencial erosivo (erosividade da chuva). As diferenças climáticas inerentes às várias condições ambientais provocam grandes

variações nos resultados, sendo que no Brasil, há poucas estações meteorológicas gerando dados climáticos para uso nos estudos de erosão hídrica, principalmente, nas áreas com agricultura altamente tecnificada, como na região dos Cerrados (Mello et al., 2013). Neste sentido, grandes avanços podem ser obtidos com a implantação de estações automatizadas e sensores de umidade do solo, com transmissão remota de dados (Silva et al., 2019c). Esses equipamentos podem contribuir de modo expressivo na geração de dados, possibilitando estudos de padrões de precipitações e suas interações com o solo, de períodos de retorno de chuvas máximas erosivas e do uso de interpoladores, utilizando conceitos de inteligência artificial, por exemplo, lógica *fuzzy*, redes neurais (Moreira et al., 2006, Moreira et al., 2008; Moreira et al., 2016) e geoestatística na espacialização dos dados (Silva et al., 2010; Aquino et al., 2012).

Especial ênfase deve ser dada às classes de solos nos estudos de erosão. Elas apresentam capacidade diferencial na resistência à erosão hídrica (erodibilidade do solo), sendo relacionada aos seus atributos intrínsecos. Para uso nos modelos, o fator erodibilidade do solo pode ser determinado por meio de métodos diretos ou indiretos (Marques et al., 1997a; Marques et al., 1997b; Silva et al., 1999; Silva et al., 2000) e em alguns modelos se separa a erosão em sulcos e entre sulcos. Uma abordagem pedológica deve ser dada para o entendimento do comportamento de cada solo em relação à erodibilidade no contexto de paisagem (Avalos et al., 2018).

Sobre o fator erodibilidade, os bancos de dados obtidos de modo direto têm sido gerados nas últimas décadas no Brasil. Entretanto, necessita-se de mais informações sobre este fator para as várias classes de solos (Silva et al., 2019c). Considerando uma nova abordagem, deve-se incluir os solos antropizados pelo uso agrícola. O homem tem provocado profundas modificações no ambiente, gerando solos com características distintas dos solos naturais. Neste contexto, é possível incluir os solos manejados nos sistemas integrados de produção agropecuária, caracterizados de longo prazo.

Apesar do grande avanço nas relações erodibilidade-forças exógenas do processo erosivo, Wang et al. (2013) relatam algumas lacunas que a pesquisa deve avançar, tais como: (1) moderna concepção da erodibilidade baseada em processos físicos; (2) determinação dos atributos de solo (método indireto), para diferentes condições de solos; (3) melhor compreensão dos mecanismos associados às variações temporais na erodibilidade do solo, uma vez que esta pode estar relacionada a fatores antrópicos; e (4) carência de métodos específicos na quantificação da erodibilidade em áreas com problemas substanciais de voçorocamentos.

Um fator de grande importância é o topográfico, que envolve a declividade, o comprimento de rampa e a pedofoma. A sua determinação, em ambiente digital, possibilita a sistematização e a padronização metodológica, tornando-se fundamental no estudo de modelagem da erosão hídrica (Oliveira et al., 2013a). O uso de técnicas de Inteligência

Artificial, Sistema de Informações Geográficas, Algoritmos, Interpoladores, Modelos Digitais de Elevação, Mapas Contínuos no formato raster e Modelos de Pedoformas, possibilita a modelagem da paisagem em grande escala, considerando os efeitos da complexidade topográfica, permitindo a aplicação de diferentes modelos e melhoria da estimativa desses, reproduzindo com fidelidade o fluxo preferencial de escoamento da água nas redes de drenagem e nos sulcos de erosão hídrica (Oliveira et al., 2012; Silva et al., 2019a; Silva et al., 2019c). Estes aspectos são fundamentais para os estudos de erosão nos sistemas integrados de produção agropecuária.

A cobertura vegetal do solo é extremamente importante na aplicação de modelos de erosão. O desenvolvimento vegetativo, o manejo das plantas cultivadas, o sistema radicular, a arquitetura da planta, a fisiologia, a deposição e a decomposição dos seus resíduos são variáveis extremamente importantes no processo de modelagem da erosão. Medições de sensoriamento remoto, através de sensores, que determinam o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) ou através de máquinas fotográficas digitais (RGB), permitem avaliar os diferentes estágios de desenvolvimento de determinada vegetação nativa ou cultivada (Beniaich et al., 2019), podendo ser utilizados na obtenção do fator cobertura vegetal na modelagem da erosão hídrica e nos estudos de impacto ambiental em larga escala, como, por exemplo, nos sistemas integrados de produção, os quais consideram os diferentes extratos de vegetação em consórcio, rotação ou sucessão. Panagos e Katsoyiannis (2019) ressaltam que séries temporais do NDVI, incluindo as fases fenológicas, contribuem para uma modelagem mais acurada, com estimativas mensais dos fatores de proteção da cobertura vegetal, resultando em avaliações dinâmicas da erosão do solo.

Tecnologias conservacionistas relacionadas ao controle e à recuperação de áreas erodidas constituem também fator relevante na magnitude das perdas de solo e água. No Brasil, são raros os estudos relacionados às perdas de água por erosão, constituindo importante lacuna científica e prática, tendo em mente a tendência de incremento dos períodos de estiagem atuais.

A pesquisa de erosão do solo no Brasil tem sido concentrada na obtenção de valores de perdas de solo e água em parcelas experimentais de tamanho médio e pequeno, em várias condições de clima, solo e sistemas de uso e de manejo. Nos sistemas integrados de produção, metodologias específicas devem ser desenvolvidas para a determinação destes valores de perdas de solo e água, destacando-se a adoção de tecnologias de automação na coleta de dados de sedimentos e fluxo superficial de água. É importante que essas pesquisas sejam também desenvolvidas e seus dados modelados no contexto de bacias hidrográficas, nas quais os valores de referência de tolerância de perdas de solo e água sejam definidos com base na sustentabilidade dos sistemas de produção. Além de considerar aspectos econômicos, quedas de produtividade, perdas de nutrientes e carbono

orgânico, assoreamento de corpos d'água e alterações no ciclo hidrológico natural.

Estudos conduzidos na Austrália, por Thomas et al. (2018), indicam que a manutenção da capacidade produtiva dos solos agrícolas exige um manejo cuidadoso, considerando variações climáticas e vulnerabilidade diferencial de solos à degradação pela erosão hídrica. Salientam ainda que os gestores dos sistemas integrados de produção agrícola e pecuária devem ter em mente a sustentabilidade e a lucratividade a longo e curto prazos, respectivamente. Explorações lucrativas e sustentáveis exigem inovações contínuas. Visando avaliar as relações produtividade-erosão, os autores utilizaram modelos de estimativa da erosão com base na USLE. Diante dos resultados eles observaram que as opções de manejo testadas apoiam os princípios da agricultura conservacionista e possibilitaram a produção sustentável dos sistemas agrícolas integrados. Os autores concluíram que: (1) o aumento da participação de leguminosas nas pastagens pode beneficiar consistentemente a produção agrícola e os indicadores ambientais; (2) as intervenções de manejo direcionadas à cobertura vegetal têm grande potencial para reduzir as taxas de erosão do solo; (3) em solos com erodibilidade alta, o manejo conservacionista, durante períodos críticos, pode diminuir substancialmente o risco de erosão, sendo que o início das intervenções de manejo é crítico; e (4) o manejo correto das pastagens e da destinação dos resíduos da colheita é fundamental para evitar o desenvolvimento de áreas críticas de degradação do solo pela erosão hídrica.

2.4.2 Inteligência artificial

Espera-se que a população mundial cresça mais dois bilhões de pessoas até 2050, em uma taxa de crescimento de 20%, enquanto a área arável deve expandir em apenas 5% (FAO, 2013). Portanto, são necessárias técnicas agrícolas “inteligentes” e eficientes para melhorar a produtividade agrícola. A avaliação da adequação da terra é uma das ferramentas essenciais para o desenvolvimento da agricultura. Várias inovações tecnológicas estão sendo implementadas para coletar e processar informações agrícolas.

O rápido desenvolvimento de redes de sensores sem fio desencadeou o *design* de dispositivos menores e de baixo custo, como a internet, constituindo ferramenta viável para automatizar e tomar decisões no domínio da agricultura. Sistemas especializados, integrando redes de sensores com sistemas de Inteligência Artificial (IA), como redes neurais e *Multi-Layer Perceptron*, têm sido indicados para avaliação da adequação das terras agrícolas. Essa avaliação é baseada na entrada de dados obtidos de vários dispositivos e sensores, os quais são usados para treinar o sistema. Esse modelo pode ser usado para avaliar e classificar as terras após cada cultivo (Vincent et al., 2019).

Estudos conduzidos por Eli-Chukwu (2019) têm demonstrado que a aplicação da IA tem sido uma necessidade crescente no setor agrícola, com grande potencial, no tocante

aos sistemas integrados de produção. O setor agrícola tem enfrentado numerosos desafios para maximizar seus rendimentos, incluindo, entre outros, o manejo inadequado do solo, a compactação e a erosão hídrica. O grande volume de informações geradas tem requisitado sistemas de gerenciamento de *big data* e as tomadas de decisão têm se apoiado em sistemas com os conceitos de IA, devido a sua flexibilidade, alto desempenho, acurácia e relação custo-benefício favorável. Como exemplo pode ser citado o apoio para definição da melhor combinação plantas-animais, conciliando produtividade e sustentabilidade no espaço e no tempo (Farias et al., 2003).

Uma abordagem crescente, em consonância com a Agricultura 4.0, é o uso de aprendizagem de máquina (*machine-learning*) para auxiliar tomadas de decisão relativas à ocorrência de degradação do solo. Peixoto et al. (2019a) encontraram estreita relação entre a degradação física do solo, particularmente, a compactação, diagnosticada através de relações entre atributos físicos do solo, e as características biométricas das plantas de soja, incluindo a produtividade. Para tal foram analisadas 15 variáveis (densidade do solo, resistência a do solo à penetração, energia integral, macroporosidade, microporosidade, porosidade total, capacidade de água disponível, porosidade do solo no domínio dos macroporos, capacidade de aeração, capacidade de aeração da matriz do solo, capacidade de campo relativa, água prontamente disponível, capacidade de água disponível com ponto de inflexão, água prontamente disponível com ponto de inflexão e índice S) as quais foram ranqueadas, de acordo com sua importância para predição de alterações da estrutura do solo que impactaram a produção vegetal. Dessas, as melhores ranqueadas foram resistência do solo a penetração, densidade do solo, capacidade de campo relativa, índice S e capacidade de aeração, isso sendo possível ao se empregar o algoritmo *Random Forest*. Tal abordagem constitui avanço no diagnóstico integrado solo-planta relativo à degradação física do solo.

Ao longo do século passado, a agricultura passou de uma indústria intensiva em mão de obra para sistemas de produção intensivos em mecanização e produção de energia, enquanto nos últimos quinze anos a indústria agrícola iniciou a utilização de técnicas digitais. Agora, os robôs e a inteligência artificial podem ser usados para apoiar atividades, como, por exemplo, colheita de frutos e capina seletiva, anteriormente totalmente dependente de mão-de-obra braçal a custos mais elevados. O processo de automação pode se estender às práticas tais como aração, gradagem, subsolagem, tratos culturais e colheita etc. Em muitos casos, os robôs podem trabalhar em parceria com os seres humanos. Essa abordagem desencadeia impactos éticos, legislativos e sociais complexos. Uma questão-chave inclui os efeitos a curto e médio prazos da agricultura robotizada nos empregos do setor. As condições, as restrições e as relações trabalho-tecnologia na avaliação do efeito da adoção da automação e robótica na agricultura, foram recentemente abordadas por Marinoudi et al. (2019).

2.4.3 Visão computacional

A tecnologia de visão computacional ou de máquina tem potencial para apoiar a agricultura, notadamente nos sistemas integrados animais-plantas. Tal tecnologia, empregando sensoriamento remoto terrestre e aéreo para avaliações de recursos naturais na atividade agro-silvo-pastoril, englobando detecção de qualidade, segurança de produtos pós-colheita, classificação e automação de processos, tende a ser mais difundida (Chen et al., 2002).

Nesta tecnologia, os avanços deverão tornar os sistemas agrícolas mais acurados, robustos e de menor custo. Por exemplo, um requisito operacional, em tempo real, pode ser atendido com apoio de um computador de alta velocidade. O painel de aquisição de imagens recebe dados de imagem de uma câmera, realiza o processamento e armazena os dados. A velocidade e a taxa de transferência de dados são rápidas o suficiente para atender às necessidades em tempo real para as atividades agrícolas. Neste contexto, ferramentas mais recentes, como redes neurais, lógica *fuzzy* difusa podem ser empregadas. Como exemplo de aplicação, Chao et al. (2001) usaram um sistema de imagem em cores para classificar vísceras de carcaças saudáveis e prejudiciais de aves, tendo desenvolvido um software neuro-*fuzzy* para aprimorar a robustez da classificação do sistema de imagem em cores.

Tendo-se em mente que a vegetação, os alimentos e produtos agrícolas são materiais biológicos, suas diferenças nas características de absorção de luz são importantes no contexto acima. Técnicas de imagem hiperespectral, associando espectroscopia e imagem (Chen et al., 2002), têm aplicações potenciais nos sistemas integrados de produção agropecuária.

Para se analisar dados de imagens hiperespectrais, as características espectrais em cada pixel e as diferenças entre pixels podem ser utilizadas. Por exemplo, nas imagens hiperespectrais de frutas, os picos de absorção específicos nas faixas de clorofila e carotenóides, podem ser usados para acessar defeitos, danos ou contaminação nas superfícies dessas plantas. Com faixas ideais definidas, elas podem ser implementadas através de um sistema de imagem para aplicações on-line ou em tempo real (Kim et al., 2001a; 2001b).

2.4.4 Técnicas de rastreamento físico e químico

O uso de técnicas de monitoramento da erosão hídrica, ciclagem de nutrientes e carbono em sistemas integrados de produção agropecuária podem embasar tomadas de decisão, tanto no controle da erosão hídrica quanto na fertilização e nutrição das plantas e na alimentação dos animais envolvidos no sistema. Técnicas inovadoras englobam o uso

dos sinais de radares, das assinaturas espectrais, o uso das propriedades mineralógicas, térmicas, magnéticas e o carbono orgânico do solo, o uso de elementos químicos traçadores, polímeros sintetizados, nano-sensores e partículas fluorescentes, deverão ser difundidas num futuro próximo. Neste sentido, indicações de fontes de deposição de sedimentos através *fingerprints* (Batista et al., 2018; Lima et al., 2020; Bispo et al., 2020; Batista et al., 2021) têm sido utilizadas a fim de elucidar os processos que regem a transferência de sedimentos, nutrientes e carbono orgânico oriundos da erosão hídrica para os corpos de água nos sistemas convencionais e integrados de produção, localizados em bacias hidrográficas. A acessibilidade às informações relativas ao processo de transferência de nutrientes e carbono orgânico, dentro dos sistemas integrados de produção agropecuária, pode auxiliar o estabelecimento de arranjos espaciais e temporais mais eficientes na ciclagem destes componentes.

Em áreas com substancial erosão do solo, é necessário identificar as fontes que fornecem sedimentos aos rios e cursos d'água a fim de melhorar a compreensão dos processos de erosão e orientar o uso e manejo do solo. Elementos geoquímicos têm sido frequentemente usados como marcadores ambientais em estudos desta natureza. Entre eles, as formas de fósforo têm sido frequentemente empregadas para rastrear especificamente sedimentos provenientes de áreas agrícolas (Tiecher et al., 2019) e fontes de sedimentos em bacias hidrográficas (Bispo et al., 2017).

2.4.5 Sensores embarcados em veículo aéreo não-tripulado ou robôs

Na agricultura, o uso de sensores está ajudando os produtores a serem mais eficientes e impactando positivamente as questões da conservação do solo e ambientais. Também chamada de agricultura inteligente, essa nova estratégia permite a maximização dos rendimentos ao usar recursos mínimos, como água, fertilizantes e sementes.

Atualmente, têm sido utilizados vários tipos de sensores na agricultura. Eles fornecem dados que ajudam os agricultores no monitoramento do manejo, a conservação e otimização dos sistemas diversificados de cultivo do solo, bem como, a adaptação a fatores ambientais variáveis no espaço e no tempo. Alguns dos principais sensores são:

- a. **Sensores de localização:** esses sensores usam sinais de satélites via *Global Positioning System (GPS)* para determinar a latitude, a longitude e a altitude, permitindo uma representação topográfica acurada do terreno, de grande importância no mapeamento digital do solo (Silva et al., 2019a). Esses dispositivos são úteis, por exemplo, para elaborar mapas de rendimento agrícola, determinando áreas que apresentam melhores condições naturais para cultivo. Além disso, é possível mapear os limites do terreno, os tipos de solos, as estradas e benfeitorias existentes e delimitar áreas com maior potencial de acúmulo de umidade.

Essas informações são muito úteis no planejamento agrícola e estes sensores têm sido amplamente utilizados na agricultura de precisão (Rezende et al., 2019).

- b. Sensores óticos:** esses sensores são utilizados, principalmente, para medir os atributos de solo e cobertura vegetal. Eles podem ser colocados em veículos terrestres ou plataformas aéreas, como Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), robôs e satélites. A reflectância dos solos e os dados de cores das plantas são apenas exemplos de variáveis de sensores óticos que podem ser utilizados na agricultura. O *Light Detection and Ranging* (LIDAR) é um sensor remoto a bordo de plataformas (tripuladas ou não tripuladas) e constitui um método direto de captura de dados, possuindo fonte própria de energia, neste caso, uma fonte de luz, o laser. Sensores multiespectrais podem gerar o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), por meio da razão entre a diferença da reflectância do infravermelho e do vermelho. Esse cálculo resulta em um índice que varia entre -1 e 1. Na prática, o valor representa a presença de vegetação, quanto maior ele é, maior é a quantidade vegetativa do local. Outros sensores amplamente utilizados são os chamados de RGB “Red”, “Green” e “Blue” (vermelho, verde e azul, respectivamente), indicando que o sensor trabalha com três cores primárias, a partir das quais consegue-se identificar diversas outras cores, normalmente presentes em câmeras fotográficas digitais, podendo ser embarcadas em VANT por exemplo na cultura da oliveira em consórcio com plantas de cobertura visando diminuir o processo de erosão (Beniaich et al., 2019) e cafeeiro, floresta nativa e florestas plantadas (Felix et al., 2021).
- c. Sensores eletroquímicos:** essa constitui uma das principais aplicações de sensores na agricultura. Esses sensores fornecem informações essenciais, tais como pH e teores de nutrientes no solo. Comumente, essa tecnologia é utilizada em conjunto com veículos especialmente projetados para essa finalidade. Eles são dotados de GPS, o que ajuda a mapear os dados químicos de toda a propriedade rural (Rezende et al., 2019).
- d. Sensores mecânicos:** nessa modalidade, os sensores usam uma sonda que penetra no solo e registra as forças de resistência, por meio do uso de células de carga. Uma forma similar desta tecnologia é usada em tratores maiores para prever os requisitos de tração para equipamentos de aterramento, ou também em veículos pequenos, como quadriciclos, nos quais o sensor é acoplado ao veículo. A utilização desses sensores na agricultura é muito importante, visto que eles estimam a força por unidade de área que as raízes precisam para vencer a resistência mecânica do solo e assim penetrar nele para a absorção de água e nutrientes, principalmente, nos períodos de estiagem. Revisão abrangente sobre

esse tema foi recentemente realizada por Peixoto et al. (2019b).

- e. Sensores eletromagnéticos (EM):** esses tipos de sensores são utilizados, principalmente, para avaliar os níveis de umidade do solo. Isso é feito mediante medições da constante dielétrica, ou permissividade elétrica relativa aparente do solo, propriedade que muda dependendo da quantidade de umidade presente no solo (Vereecken *et al.*, 2014). Os sensores mais utilizados são aqueles que utilizam as técnicas *time-domain reflectometry* (TDR) e *frequency-domain reflectometry* (FDR) – sensores capacitivos – esses últimos de menor custo (Romano, 2014). Outras técnicas utilizadas, mais comuns em geofísica, são a indução eletromagnética (EMI) e a tomografia de resistividade elétrica (ERT). Essas técnicas medem a resistividade elétrica do solo ou, o seu inverso, a condutividade elétrica. Como pode ser citado o estudo conduzido por Bernardi et al. (2019), cujo objetivo foi caracterizar a variabilidade espacial da resistividade elétrica do solo devido aos diferentes graus de umidade do solo, em sistemas integrados de produção agropecuária. A resistividade elétrica do solo neste trabalho foi medida com o sensor de contato *Automatic Resistivity Profiling* (ART). Os mapas obtidos estratificaram os ambientes, indicando diferenças do movimento e da acumulação de água nos horizontes do solo. A ERT possui a vantagem de prever a umidade do solo em profundidade, possibilitando investigação a 50m ou mais, por exemplo, permitindo avaliações quanto à hidrologia do solo (Jayawickreme et al., 2011; Dick et al., 2018) e também em escala de manejo de água para irrigação (Vanella et al., 2018) e manejo do solo em si, acessando efeitos na qualidade física do solo após adoção de sistemas de manejo conservacionista (Piccoli et al., 2019). Há ainda aplicações no uso dos sensores EMI para diagnóstico da fertilidade do solo e estabelecimento de zonas de manejo na Agricultura de Precisão (Molin e Tavares, 2019). Além da umidade do solo, os autores relatam predição da CTC, dos teores de K disponível e Ca trocável, matéria orgânica, saturação por bases, salinidade e teor de argila. É importante ressaltar que esses sensores necessitam de calibração para as condições específicas de medição. Exemplos para sensor capacitivo podem ser vistos em Silva et al. (2012) e Silva et al. (2022), mostrando ineficiência de calibrações importadas de solos diferentes das condições brasileiras, comumente fornecidas pelos fabricantes. Para ERT, calibrações para medição da umidade do solo e do grau de compactação são apresentados por Melo et al. (2021). A aplicação da ERT para detectar a compactação do solo foi estudada por Peixoto et al. (2019c), os quais observaram mudanças marcantes na resistividade elétrica, medida até 100cm de profundidade, antes e depois da descompactação mecânica com subsolador (Figura 3).

Revisão realizada por Munaf et al. (2020) analisa os princípios e as tecnologias

disponíveis neste contexto, e propõe uma síntese tecnológica futura para a implementação de sistemas precisos de semeadura baseados em mapas gerados por sensores capazes de registrar o histórico de indicadores de qualidade das culturas e dos solos. O sistema é composto da fusão de dados obtidos a partir da integração de sensores diversos. Na citada revisão, os autores também discutem os benefícios socioeconômicos potenciais deste sistema.

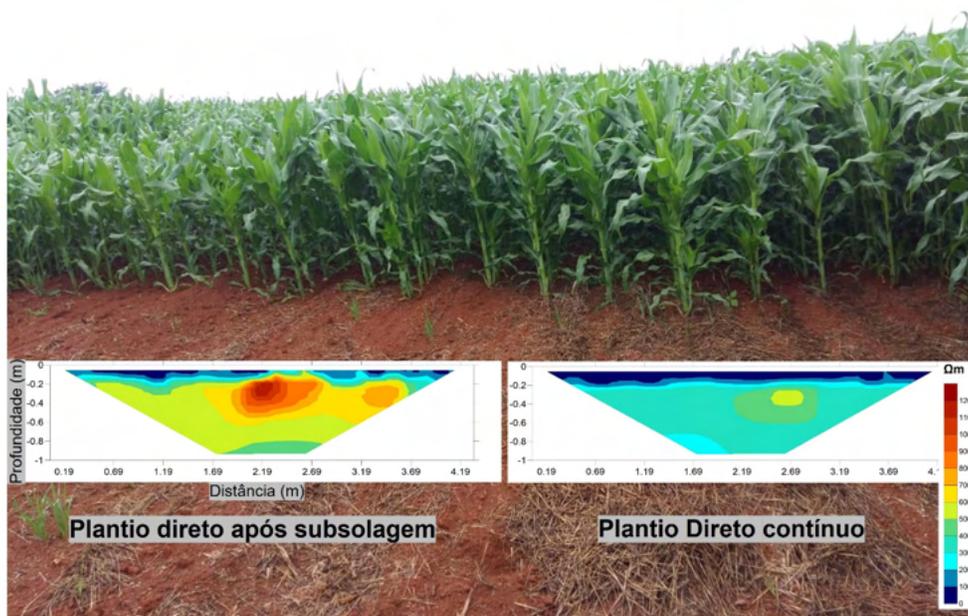


Figura 3. Avaliação da resistividade elétrica do solo em área de sob sistema de plantio direto contínuo com presença de compactação do solo e em área ao lado a qual recebeu descompactação mecânica com subsolador, em Nazareno, MG. Fonte: elaborado pelos autores.

A rede de sensores sem fio é um tipo especial de redes constituídas para uma finalidade específica, e têm sido empregadas no monitoramento de locais remotos, de difícil acesso ou em áreas de risco. Dentre as diversas aplicações, pode-se destacar o monitoramento agrícola, que envolve o acompanhamento e a observação contínua das áreas de plantio, com o objetivo de avaliar as mudanças ocorridas nesse ambiente. Esse monitoramento é importante no processo de tomada de decisão, visto que auxilia na solução de problemas, como erosão, umidade do solo, nutrientes no solo, cobertura vegetal e mudanças climáticas que podem prejudicar a produtividade das culturas nos sistemas

integrados de produção agropecuária, além de monitorar também os animais integrados no sistema. O potencial de sua aplicação, nos sistemas integrados de produção, é grande. O monitoramento de ambientes agrícolas pode ganhar mais acurácia, com o uso destas redes de sensores, possibilitando a localização precisa de anormalidades na área monitorada e consequentemente embasando soluções diferenciais e específicas (Dota et al., 2010).

A Figura 4 ilustra o uso de estações compostas de minissensores embarcados em VANT apresenta um grande potencial de determinação de temperatura e umidade atmosférica e também emissões atmosféricas de gases, como exemplo o dióxido podendo ser determinados em altitudes e áreas diversas nos sistemas integrados de produção (Silva et al., 2018).

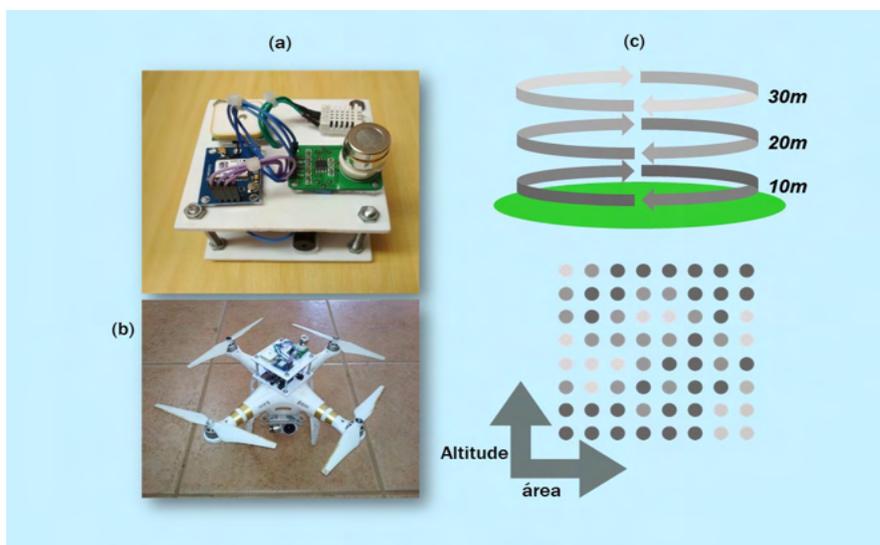


Figura 4. Miniestações de sensores de temperatura, umidade e dióxido de carbono (a) embarcados em VANT (b) e o potencial de determinação das variáveis em altitude e área (c) nos sistemas integrados de produção. Fonte: Silva et al. (2018).

Parece ser o momento certo para se avançar em direção a uma agricultura moderna e sustentável, capaz de mostrar o poder do gerenciamento orientado no enfrentamento dos desafios para produção sustentável de alimentos no século XXI. Esta agricultura, que considera os sistemas integrados de produção, é conhecida também no meio tecnológico como Agricultura 5.0, faz parte da agenda dos principais fabricantes de equipamentos agrícolas para a próxima década e inclui o desenvolvimento de robôs agrícolas (Saiz-Rubio e Rovira-Más, 2020).

No Brasil, na região oeste do Paraná, foram desenvolvidos estudos objetivando verificar a expansão das plantações de eucalipto em um cenário de integração pecuária-

florestal para atender as demandas de biomassa da agroindústria, além de estimar a área com potencial de expansão da agricultura. Foram utilizados sensores de imagens embarcados no satélite Landsat-8 e Modelos Digitais de Elevação (MDE) integrados ao geoprocessamento do GPS. Verificou-se que a conversão de 4,24% das áreas de pastagem em integração pecuária-florestal atenderia à demanda atual de aparas de madeira das agroindústrias e o uso de 8,04% das áreas atenderia tal demanda até 2025. Verificou-se que existem 3972,10 km² aptos para expansão da agricultura na região (Lenz et al., 2019).

Os MDE também podem ser utilizados para se obter diferentes atributos de terreno por meio de técnicas de mapeamento digital (Sila et al., 2019a). Dentre esses, Silva et al. (2014) utilizaram o índice de umidade (*Wetness Index*) obtido por diferentes formas e resoluções testadas. Os autores concluíram que na época seca o índice de umidade tem boa correlação com a umidade do solo medida em campo com sensores de capacitância, especialmente a 1m de profundidade, confirmando seu potencial para subsidiar estudos hidrológicos e de manejo do solo para culturas com raízes profundas.

Outro estudo de natureza básica que pode nortear o uso futuro de tecnologias de sensores embarcados foi desenvolvido por Santos et al. (2014). Nesse trabalho, os autores concluíram ser possível estimar a umidade do solo na zona radicular, isto é, onde há maior absorção de água pelas plantas (por exemplo, o cafeeiro) refletindo o estado hídrico da planta, por meio do índice de vegetação EVI-2. Há um atraso na resposta, ou seja, os dados do sensor de EVI-2 refletem condição de 5 ou 10 dias atrás da medição de umidade do solo, tempo esse que varia conforme as condições da planta e do clima. Assim, essa informação pode ser utilizada, por exemplo, para identificar estresse hídrico ou embasar o manejo da irrigação a depender das condições e adequações necessárias.

As tecnologias também podem avaliar patógenos e pragas de plantas, que ameaçam significativamente a agricultura e a silvicultura em todo o mundo, comprometendo a cobertura vegetal e conseqüentemente deixando o solo exposto a erosão hídrica. A implementação de métodos remotos, altamente eficientes e acessíveis para detectar e monitorar doenças e pragas de plantas em vastas áreas, poderiam facilitar a proteção das mesmas. Nesse sentido, diferentes métodos de aplicação de sensores remotos inovadores têm sido utilizados na detecção, mineração de dados e em monitoramentos, via algoritmos em várias escalas de trabalho (Zhang et al., 2019). Os sistemas de detecção incluíram: sensores espectrais no visível e infravermelho próximo (VIS-NIR); sensores térmicos e de fluorescência; e *Synthetic Aperture Radar* (SAR) e LIDAR. Segundo os autores, o estudo possibilitou identificar, diferenciar e determinar a gravidade de doenças e pragas em grandes áreas.

Uma inovação na conservação do solo engloba o monitoramento da erosão hídrica e da cobertura vegetal utilizando os VANT, com planos de voos que utilizam recursos modernos de controle e automação, baseados nos princípios da aerofotogrametria, estereoscopia e visão computacional, entre outras tecnologias e sensores diversos

embarcados. Estes podem gerar nuvens de imagens georreferenciadas de superfícies complexas, à semelhança de imagens orbitais. Essa tecnologia propicia monitorar e modelar a ocorrência da erosão hídrica e avaliar a qualidade da cobertura vegetal, no tempo e no espaço, utilizando os sensores embarcados em VANT, tais como: *scanner a laser*, LIDAR, câmera fotográfica digital convencional e multiespectral, sendo estas imagens tratadas em programas desenvolvidos especificamente para tais fins.

A avaliação da erosão do solo a partir de sensores embarcados em VANT é baseada no monitoramento da variação topográfica do terreno ao longo do tempo. Durante um evento erosivo, a superfície do solo está em contínua transformação. Assim, dependendo do volume de solo transportado, o processo erosivo pode resultar em consideráveis variações topográficas, podendo apresentar impactos significativamente negativos na atividade agrícola (Figura 5).

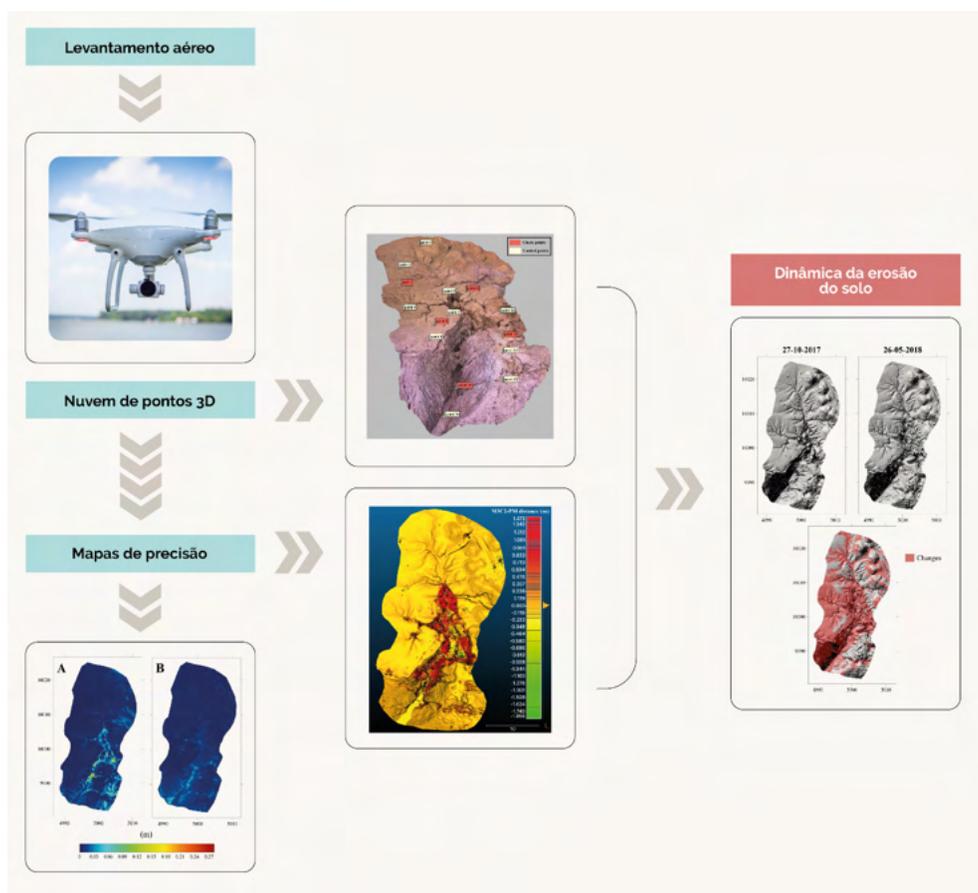


Figura 5. Fluxo de aquisição e processamento de imagens para geração de mapas de erosão e deposição do solo, possibilitando o estudo da dinâmica do processo erosivo ao longo do tempo.

Fonte: Adaptado de Cândido et al. (2020b).

Dessa forma, o surgimento de métodos que permitam a obtenção de modelos topográficos de alta resolução remotamente é de suma importância e incluem muitas aplicações nas geociências (James e Quinton, 2014) e nos estudos de erosão hídrica (Cândido et al., 2020a; 2020b). Existe uma grande variedade de métodos disponíveis que permitem obter informações detalhadas do relevo, como scanners a laser terrestres e aéreos, varredura por sonar, sistemas de georreferenciamento DGPS-RTK e estações totais (Brasington, 2010; Höfle e Rutzinger, 2011; Hohenthal et al., 2011; Castillo et al., 2012; Day et al., 2013; James e Quinton, 2014; Vinci et al., 2015). Entretanto, apesar da diversidade de métodos disponíveis, a geração de MDE de alta resolução requer grandes investimentos em equipamentos e treinamento de pessoal. Assim, com o surgimento de métodos baseados em imagens como a fotogrametria digital, deve ocorrer uma drástica redução destes custos operacionais.

A fotogrametria digital tem se tornado acessível aos pesquisadores e usuários em geral, devido ao desenvolvimento de métodos que possibilitam a calibração precisa de câmeras não métricas e confiável automação do processo fotogramétrico. Desde o desenvolvimento da aerofotogrametria digital de curto alcance, esta técnica tem sido bastante aplicada na obtenção de modelos tridimensionais (3-D) da superfície do solo (Figura 6) (Gessesse et al., 2010; Heng et al., 2010; Stöcker et al., 2015; Goetz et al., 2018; Siqueira Junior et al., 2019; Cândido et al., 2020a, 2020b).



Figura 6. Nuvem 3D de pontos utilizada para geração de modelos digitais de elevação de alta resolução da superfície do solo. Fonte: Cândido et al. (2020b).

Recentes avanços nas tecnologias de fotogrametria digital têm permitido gerar modelos topográficos do terreno em alta resolução a partir de imagens obtidas de câmeras fotográficas comuns em caminhamento terrestre, ou seja, com a base localizada na superfície (Berger et al., 2010; Heng et al., 2010; Nouwakpo e Huang, 2012; Nouwakpo et al., 2014; Guo et al., 2016). Esta técnica tem a vantagem de ter um baixo custo na aquisição de equipamentos, com valores substancialmente menores do que os scanners a laser. Dessa forma, a redução no custo e as melhorias na qualidade de câmeras compactas têm popularizado o acesso à modelagem fotogramétrica e encorajado sua aplicação nas diversas áreas das geociências (Lane, 2000; Chandler et al., 2002; Brasington e Smart, 2003; Marzoff e Poesen, 2009; Bird et al., 2010). Assim, a técnica de fotogrametria digital tem sido utilizada para gerar MDE com resoluções que variam de 1 a 15 mm, suficientes inclusive para estudos relacionados à microtopografia do solo (Brasington e Smart, 2003; Babault et al., 2004; Rieke-Zapp e Nearing, 2005; Aguilar et al., 2009; Nouwakpo e Huang, 2012; Guo et al., 2016).

Visando superar algumas limitações da fotogrametria tradicional, o uso de sensores embarcados em VANT, para aquisição de imagens da superfície do solo, tem sido objeto de estudos nos últimos anos (Bemis et al., 2014; James e Robson, 2014; O'Connor et al., 2017; Eltner et al., 2018; Siqueira Junior et al., 2019; Cândido et al., 2020). Os VANT têm algumas vantagens sobre aeronaves pilotadas, especialmente em relação ao seu baixo custo, flexibilidade operacional e maior resolução espaço-temporal das imagens a partir das quais os MDE são derivados (Figura 6) (Harwin e Lucieer, 2012; Anderson e Gaston, 2013; Hugenholtz et al., 2015; Balek e Blahůt, 2017). Os VANT requerem menor tempo para aquisição dos dados quando comparados à outras técnicas, reduzindo significativamente os custos operacionais. Além disso, a resolução e acurácia dos resultados obtidos por VANT não são obtidas através de imagens de satélites (Immerzeel et al., 2014), tornando-se útil principalmente em locais onde o uso de outras técnicas não é viável ou é arriscado. Para estudos de grandes deslocamentos de massa, os VANT proporcionam uma plataforma conveniente de sensoriamento remoto, devido à habilidade de adquirir imagens de alta resolução, mesmo em terrenos de difícil acesso. Siqueira Junior et al. (2019), estudando a viabilidade do uso de VANT no monitoramento da erosão hídrica em voçorocas, conseguiram diferenciar os diferentes processos erosivos que ocorreram simultaneamente no ambiente estudado ao longo do tempo através da análise temporal dos MDE. De acordo com Cândido et al. (2020a, 2020b), a fotogrametria a partir de VANT pode ser utilizada inclusive para estimar a erosão laminar, com precisão milimétrica (Figura 7).

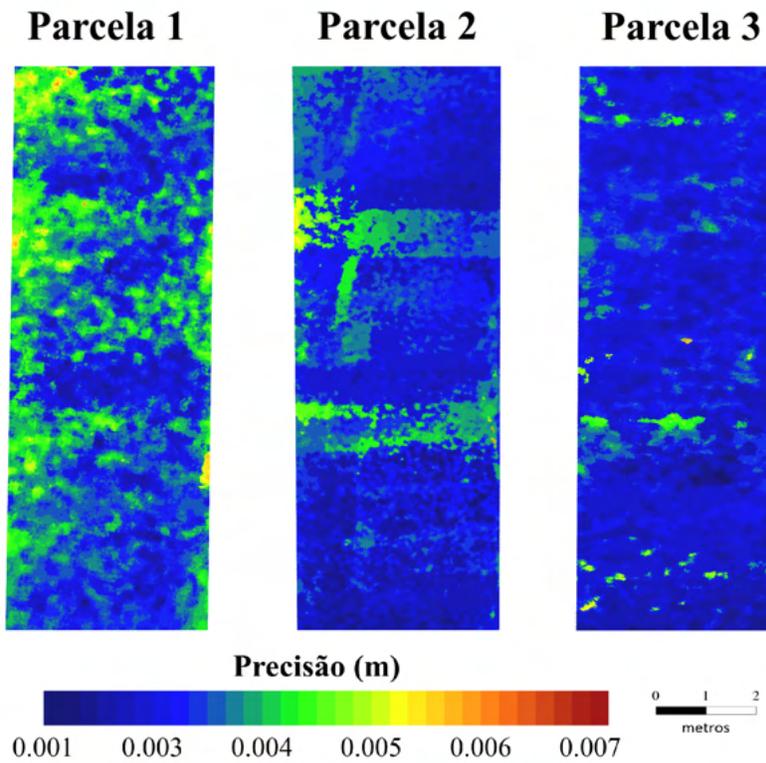


Figura 7. Variação espacial do erro ao longo de área mapeada por VANT. A escala milimétrica de precisão do levantamento possibilita o uso da técnica para monitoramento dos diferentes tipos de erosão, incluindo erosão difusa. Fonte: Cândido et al. (2020a).

Tendo em vista a dificuldade de reconstrução da superfície do solo, a partir de fotografias aéreas em áreas com cobertura vegetal, uma técnica baseada na fusão entre laser e fotogrametria aérea tem sido utilizada, principalmente em regiões agrícolas com relevo acidentado. Cucchiari et al. (2020) demonstraram a eficiência desta técnica na reconstrução de terraços em região agrícola, com topografia complexa e coberta por vegetação, obtendo MDE com resolução centimétrica. A determinação do MDE foi realizada com máquina fotográfica digital, embarcada em VANT em uma área de 100 ha e foi possível gerar o mapa de fluxo de enxurrada e dimensionar um sistema de terraços para a cultura do tabaco em Mafra, SC (Silva et al., 2017), como pode ser observado na Figura 8. Estes resultados abrem novas possibilidades para estudos de erosão hídrica, permitindo a obtenção de dados com alta resolução temporal, além do baixo custo no monitoramento do processo erosivo em extensas áreas agrícolas sob cultivo intensivo.

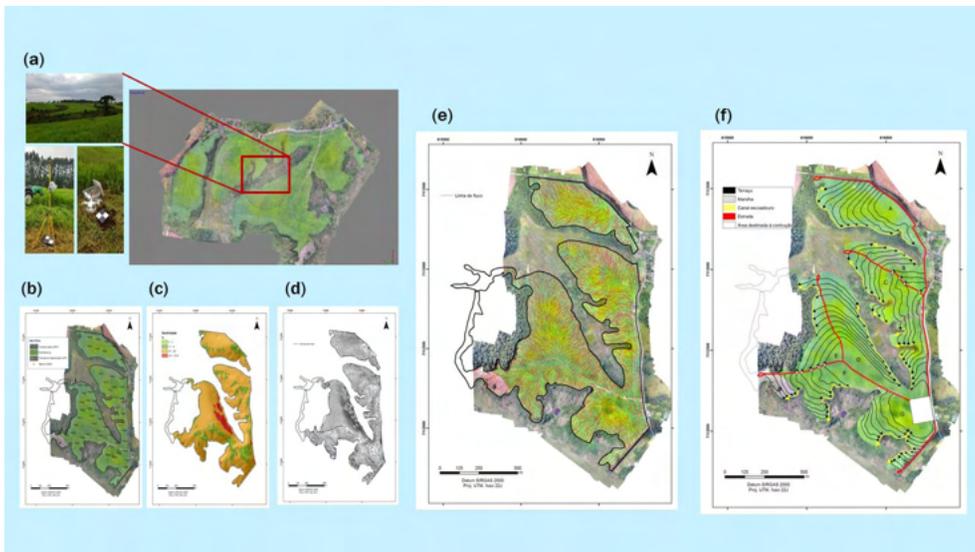


Figura 8. Levantamento de uma área para implantação de práticas mecânicas de conservação do solo utilizando VANT e estação total (a), mapa de uso atual e MDE (b), mapa de declividade (c), mapa de isolinhas (d), mapa do fluxo de enxurrada (e) e locação de terraços, canais escoadouros, estradas e divisão de glebas de cultivo (f), fazenda para produção de tabaco, Mafra, SC. Fonte: Adaptado de Silva et al. (2017).

Entre as várias metodologias de determinação do carbono orgânico no solo descritas nos estudos de Nayak et al. (2019), destacam-se as técnicas espectroscópicas recentes, via sensores multiespectrais e, ou, hiper-espectrais localizados em VANT ou plataformas de satélite.

Estudos conduzidos no Equador por Cevallos et al. (2018), abordam que novos desafios têm surgido com a modernização das práticas agrícolas, como o conceito de sustentabilidade ambiental e econômica do processo produtivo, a exemplo dos sistemas integrados de produção agropecuária. A lucratividade da propriedade rural depende da qualidade dos alimentos fornecidos aos animais, que, se não forem administrados de maneira técnica, podem afetar a lucratividade da produção e a conservação do solo. Os autores analisaram a variação do NDVI gerado através de sensores multiespectrais embarcados em VANT em sistemas de manejo de pastagens. Para validar o estudo foram realizadas determinações com os sensores no laboratório. O NDVI produzido apresentou um bom ajuste estatístico em relação aos dados de referência de laboratório e reduziu bastante os custos na obtenção dos dados. Estudos avaliando a cobertura vegetal por NDVI em pomares de oliveiras consorciados com plantas de cobertura foram desenvolvidos por Beniaich (2018; 2020) podem ser observados na Figura 9, o potencial do uso deste sensor na distinção dos vários tipos de cobertura do solo.

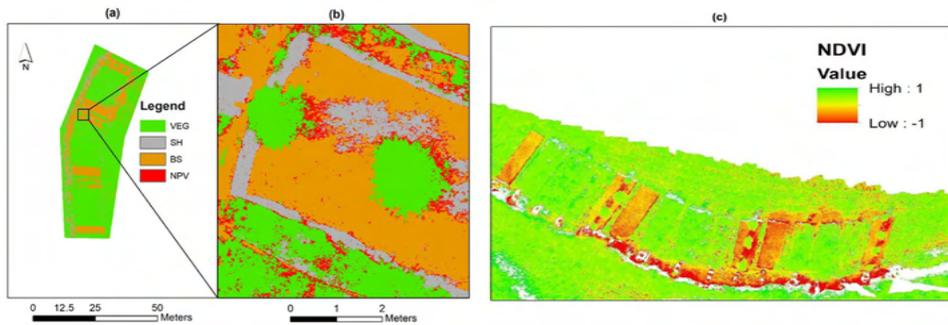


Figura 9. Parcelas para estudo de erosão na cultura da oliveira (a), detalhes das imagens de NDVI indicando VEG = copa das oliveiras, SH = sombra, BS = solo descoberto e NPV = vegetação não fotossintética (palha) (b) e variação dos valores de NDVI na área experimental (c). Fonte: adaptado de Beniaich (2018).

A adoção de métodos de melhoramento requer a criação de uma grande população geneticamente diversificada. Experimentos, em grande escala, são necessários para a rápida aquisição de dados fenotípicos visando explorar a correlação entre informações genômicas e fenotípicas. As tecnologias tradicionais de detecção em pesquisas envolvendo fenótipos em condições de campo dependem de amostragem manual, implicando em muito tempo de trabalho. Assim, pequenos VANT equipados com vários sensores podem simplificar o procedimento de levantamento, diminuir o tempo de coleta de dados e reduzir custos. Neste sentido, estudos realizados por Arnpatzidis et al. (2019) avaliaram as características fenotípicas de laranjeiras doces enxertadas em 25 cultivares de porta-enxertos com diferentes influências no crescimento e produtividade das plantas, utilizando fenótipos de alto rendimento com base em VANT. Os dados coletados pelo VANT foram comparados com os dados coletados manualmente, de acordo com os procedimentos hortícolas padronizados, permitindo a detecção e contagem de árvores cítricas com alta acurácia (99,9%) e a estimativa do tamanho do dossel das árvores com alta correlação ($R = 0,84$) com os dados coletados manualmente.

Nas próximas décadas, a África Subsaariana enfrentará grandes desafios para aumentar de maneira sustentável a produção de alimentos, caso se mantenha o ritmo de crescimento contínuo da população. A agricultura conservacionista foi proposta para melhorar a qualidade e a produtividade do solo para fazer frente à essa situação. Para aumentar a produção de milho, o principal alimento lá, a seleção de genótipos e práticas de manejo adequados foi realizada via tecnologias inovadoras de sensoriamento remoto. Para geração dos índices, foram utilizados os sensores RGB, presentes em câmeras fotográficas digitais e sensores multiespectrais para produzir o índice NDVI, embarcados em VANT. Oito híbridos de milho foram avaliados sob diferentes densidades de plantio e práticas de preparo do solo. Os resultados deste estudo destacaram a aplicabilidade

dessas abordagens de sensoriamento remoto na avaliação do desempenho das culturas e na escolha de híbridos. Segundo os autores, estas tecnologias podem desempenhar um papel fundamental na superação das limitações tradicionais de coleta e processamento de dados em estudos envolvendo fenótipos em larga escala (Gracia-Romero et al., 2018).

2.4.6 Aplicações de equipamento portátil de fluorescência de raios-x (pXRF)

Assim como em qualquer tipo de uso do solo, o sucesso dos sistemas de produção integrados (e.g., lavoura-pecuária, lavoura-pecuária-floresta) depende do conhecimento dos atributos do solo, o que irá garantir o uso sustentável desse recurso natural. Para isso, é importante a correta análise do solo. Os métodos convencionais de análise de solo são reconhecidos por serem dispendiosos, demorados e geradores de efluentes químicos. Atualmente, tais métodos têm sido gradualmente substituídos ou complementados por métodos espectrométricos, como a fluorescência de raios-x.

A espectrometria de fluorescência de raios-x (FRX) e técnicas relacionadas são procedimentos analíticos muito bem conhecidos e estabelecidos para determinação da composição elementar total de diferentes materiais (Marguí e van Grieken, 2013). De forma simples, o princípio dessa análise tem como base a energia e , ou, o comprimento de onda de um fóton emitido por um átomo, após ele ser excitado por uma fonte de raios-x (Jenkins, 1999). Os raios-x atingem a amostra e os elétrons saltam de camadas interiores para camadas mais exteriores da eletrosfera. Como consequência, elétrons de camadas mais externas retornam para uma camada interior, condição de menor energia cinética, para ocupar a vacância. A energia eletromagnética (fóton) emitida por esses elétrons é chamada de fluorescência (Marguí e van Grieken, 2013; Weindorf et al., 2014). Cada elemento possui sua assinatura espectral discreta. Assim, é possível identificar cada elemento pela sua linha espectral com base nos valores de energia (keV) ou comprimento de onda (nm), e quantificar a concentração com base na intensidade dos picos do espectro. Tem-se, portanto, basicamente três técnicas envolvendo a FRX: (1) *wavelength dispersive X-ray fluorescence* (WDXRF); (2) *energy dispersive X-ray fluorescence* (EDXRF); e (3) *total reflection X-ray fluorescence* (TXRF). Mais detalhes sobre cada uma dessas técnicas podem ser encontrados em Marguí e van Grieken (2013).

Devido aos avanços tecnológicos ocorridos, foi possível a miniaturização dos equipamentos de grande porte de fluorescência de raios-x. Atualmente, existem no mercado vários modelos e marcas de equipamentos portáteis de fluorescência de raios-x (Weindorf et al., 2014; Silva et al., 2021). Esses equipamentos na área de fluorescência de raios-x ficaram conhecidos como pXRF (*portable X-ray fluorescence*) ou FPXRF (*field portable X-ray fluorescence*). Os equipamentos pXRF e FPXRF empregam a técnica

EDXRF (*energy dispersive X-ray fluorescence*). Desde 2010, o pXRF pode ser considerado como uma das mais inovadoras técnicas analíticas na Ciência do Solo no mundo todo (Weindorf et al., 2014; Ravansari et al., 2019; Silva et al., 2021). Esse equipamento tem sido empregado com sucesso para fins agrônômicos e ambientais (Weindorf et al., 2014). Assim, há grandes expectativas e oportunidades para o uso do pXRF em sistemas de produção integrados, permitindo a caracterização desde a rocha até os produtos finais obtidos (Feng et al., 2020). Na Figura 10, algumas possibilidades e potencialidades de uso do pXRF foram sumarizadas.

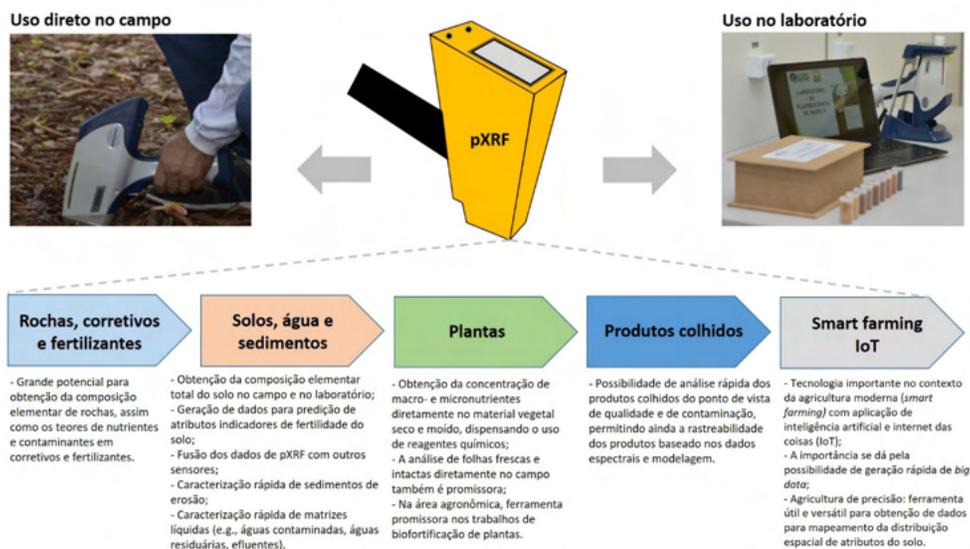


Figura 10. Potencialidades do uso do pXRF nos sistemas integrados de produção. Fonte: elaborado pelos autores.

No Brasil, esforços nas aplicações do pXRF têm sido feitos de forma mais intensiva nos últimos cinco anos (Silva et al., 2021). As principais aplicações e oportunidades para solos tropicais com uso do pXRF foram revisadas e sumarizadas por Ribeiro et al. (2017) e, mais recentemente, por Silva et al. (2021). Literalmente, o uso de equipamentos portáteis como o pXRF levam o laboratório ao campo. Como principais vantagens, tem-se o baixo custo operacional da análise, determinação multielementar (e.g., Mg até U) em alguns segundos (30 a 60 s) e, principalmente, envolve uma análise dentro do conceito atual de “green chemistry” (Marguí e van Grieken, 2013). A análise de solo via pXRF não requer o uso de reagentes químicos e não gera resíduos. Como as demais técnicas de análise via XRF (e.g., WDXRF, EDXRF e TXRF), algumas limitações (não desvantagens) podem haver, tais como: interferência espectral, condições e preparo da amostra (Ravansari et al., 2019; Silva et al., 2021). Entretanto, uma vez que essas limitações são conhecidas e

sejam corrigidas, o pXRF tem sido uma potencial ferramenta nas determinações analíticas do solo.

Os equipamentos pXRF reportam a composição elementar total do material a ser analisado. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) reconhece oficialmente a caracterização de solos e sedimentos via pXRF (método USEPA 6200) (USEPA, 2007). Além disso, o pXRF é considerado um dos métodos de análise química de solos e sedimentos na série americana *Methods of Soil Analysis* (Weindorf e Chakraborty, 2016). No Brasil, apesar do método pXRF ainda não ser reconhecido oficialmente para determinação da composição elementar total de solos, sedimentos, plantas, resíduos etc., ele tem sido utilizado com sucesso na caracterização química de solos tropicais (Ribeiro et al., 2018; Lima et al., 2019; Andrade et al., 2020a). Além disso, os dados espectrais obtidos têm sido utilizados na predição de vários atributos do solo de interesse por meio de procedimentos simples ou avançados de modelagem estatística, dependendo da necessidade (Andrade et al., 2020a, 2020b; Silva et al., 2021).

Dentre as aplicações agrônômicas e conseqüentemente nos sistemas integrados de produção, a composição elementar obtida via pXRF após uma rápida análise do solo (menor ou igual a 60s por amostra), tem permitido a predição de vários outros atributos de interesse, como pH (Teixeira et al., 2020), capacidade de troca de cátions (Andrade et al., 2020b; Teixeira et al., 2020), matéria orgânica (Andrade et al., 2020b), textura (Andrade et al., 2020a; Silva et al., 2020), macro (Teixeira et al., 2018) e micronutrientes (Pelegriño et al., 2018; Lima et al., 2019).

Outra grande contribuição do pXRF foi obtida recentemente na área de nutrição de plantas. Mais de 600 amostras de folhas secas e moídas de 28 culturas de relevância no Brasil foram analisadas via pXRF. Uma forte correlação 1:1 foi obtida entre o pXRF e o método de laboratório tradicionalmente empregado para análise foliar (Borges et al., 2020a). Há também grandes possibilidades de uso do pXRF em folhas intactas e frescas diretamente no campo, como observado para K, Ca, S e Si em cana-de-açúcar (Guerra et al., 2018). No contexto da integração lavoura-pecuária-floresta, os dados espectrais, obtidos a partir da análise de fezes via pXRF, foram utilizados com sucesso na predição da digestibilidade em bovinos e ovinos (Hoffmann et al., 2020), apontando para o potencial desta metodologia em estudos desta natureza.

Uma contribuição importante do equipamento de pXRF do ponto de vista da conservação do solo, água e ambiente está relacionada ao fato de não necessitar de reagentes químicos e nem gerar resíduos poluentes. Assim, quando o interesse for a obtenção da composição elementar total de solos e sedimentos, o pXRF tem sido uma valiosa ferramenta. Elevadas correlações têm sido encontradas entre pXRF e métodos convencionais de laboratório envolvendo a digestão ácida de amostras seguida da determinação dos elementos via espectrometria de absorção atômica ou de emissão

atômica por plasma acoplado (Silva et al., 2019b). Como exemplo, solos hidromórficos de um importante ecossistema úmido (Veredas) de ocorrência típica no bioma Cerrado do Brasil foram caracterizados com sucesso via pXRF (Borges et al., 2020b). Na área da conservação do solo, o pXRF pode ser muito útil para uma caracterização rápida e acurada de sedimentos e água em parcelas de perdas de solo, trazendo informações interessantes sobre a perda de nutrientes e carbono orgânico no processo erosivo. Além disso, a caracterização de sedimentos coletados em rios e lagos, para obtenção de elementos traçadores da origem do processo erosivo, tem sido beneficiada pela tecnologia pXRF (Batista et al., 2018; Bispo et al., 2020; Batista et al., 2021).

3 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Inovações, no curso da história da humanidade, possibilitaram que desafios na produção de alimentos fossem superados pelo homem, porém a preservação do planeta continua sendo um grande desafio e não é diferente no que se refere ao contexto de segurança alimentar para o futuro. A inovação e a tecnologia são constituintes essenciais para o surgimento de soluções, que otimizem as atividades da cadeia produtiva de alimentos. Isto inclui a convergência de diversos setores das áreas econômica, social e ambiental em um contexto multidisciplinar, englobando conceitos zootécnicos, agrônômicos, controle e automação, inteligência artificial, eletrônica, tecnologia da informação e instrumentação, entre outras áreas, para que se possa continuar alimentando as gerações futuras de forma sustentável.

Os dados gerados pela pesquisa têm demonstrado que o solo se encontra no centro dos principais desafios do planeta, como na produção de alimentos, fibras e energia, apresentando papel fundamental na mitigação de efeitos de mudança climática, na manutenção dos mananciais hídricos, na sustentabilidade e na biodiversidade. Devido à tamanha importância, no Brasil, os sistemas conservacionistas como o plantio direto, e mais recentemente, os sistemas integrados de produção agropecuária têm sido adotados, visando abranger grande parte das exigências referendadas em relação ao solo.

A degradação do solo e da água e, conseqüentemente, os impactos ambientais negativos relacionados são críticos atualmente no Brasil e no mundo, refletindo diretamente nos segmentos da segurança, do econômico, do social e do político. Neste contexto, as propostas, incluindo inovações de monitoramento dos atributos de solo e a planta, no tempo e no espaço, tornam-se fundamentais para o sucesso e sustentabilidade do ambiente e dos sistemas integrados de produção agropecuária.

A aplicação destas tecnologias inovadoras na geração de dados acurados nos sistemas integrados de produção agrícola, pecuária e silvicultural, tem grande potencial para revolucionar o setor, acelerando e influenciando decisões de gerenciamento para

otimizar a eficiência da produção e minimizar impactos negativos no solo e no ambiente. Ainda há muito trabalho a ser feito, englobando a largura de banda de redes no sentido de acelerar o tráfego de dados na internet, melhorar os sistemas de proteção dos dados (segurança e privacidade cibernética) e treinar técnicos do setor nas melhores práticas de gerenciamento de uso dessas tecnologias e dados nas propriedades rurais. Nessas áreas, os esforços extensionistas agilizarão a adoção destas tecnologias inovadoras e o impacto total dos dados na produção agrícola sustentável.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (processos 202938/2018-2 e 312799/2018-7) e à FAPEMIG (processos CAG-APQ 01053-15, APQ 00802-18, APQ-02075-16 e PPM-00774-18) e à CAPES, através do Programa Print-Capes (Processo 888887.363577/2019-00) pela concessão das bolsas e do apoio financeiro aos projetos. Os autores agradecem as contribuições dos Professores John N Quinton e Michael R James, da *Lancaster Environment Centre, Lancaster University, UK*, pela colaboração técnico-científica, envolvendo as tecnologias de sensores embarcados em Veículo Aéreo Não Tripulado e a técnica dos traçadores nos estudos de erosão (*Fingerprints*). Agradecem também ao Professor David C Weindorf, atualmente na *Central Michigan University, USA*, pelo suporte no uso do pXRF na Ciência do Solo.

REFERÊNCIAS

Aguilar MA, Aguilar FJ, Negreiros J. Off-the-shelf laser scanning and close-range digital photogrammetry for measuring agricultural soils microrelief. *Biosyst Eng.* 2009; 103: 504-517.

Alexandratos N, Bruinsma J. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper, no. 12-03. Rome: FAO. 2012.

Anache JAA, Wendland EC, Oliveira PTS, Flanagan DC, Nearing MA. Runoff and soil erosion plot-scale studies under natural rainfall: A meta-analysis of the Brazilian experience. *Catena.* 2017; 152: 29-39.

Anderson K, Gaston KJ. Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Front Ecol Environ.* 2013; 11: 138-146.

Andrade R, Faria WM, Silva SHG, Chakraborty S, Weindorf DC, Mesquita LF, Guilherme LRG, Curi N. Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. *Geoderma.* 2020a; 357: 113960.

Andrade R, Silva SHG, Weindorf DC, Chakraborty S, Faria WM, Mesquita LF, Guilherme LRG, Curi N. Assessing models for prediction of some soil chemical properties from portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry data in Brazilian Coastal Plains. *Geoderma.* 2020b; 357: 113957.

Anghinoni I, Carvalho PCF, Costa SEVGA. Abordagem sistêmica do solo em sistemas integrados de produção agrícola e pecuária no subtropical brasileiro. *Tópicos Ci Solo*. 2013; 8: 325-380.

Aquino RF, Silva MLN, Freitas DAF, Curi N, Mello CR, Avanzi JC. Spatial variability of the rainfall erosivity in southern region of Minas Gerais state, Brazil. *Cienc Agrotec*. 2012; 36: 533-542.

Ampatzidis Y, Partel V, Meyering B, Albrecht U. Citrus rootstock evaluation utilizing UAV-based remote sensing and artificial intelligence. *Comput Electron Agr*. 2019; 164: 104900.

Avalos FAP, Silva MLN, Batista PVG, Pontes LM, Oliveira MS. Digital soil erodibility mapping by soilscape trending and kriging. *Land Degrad Dev*. 2018; 29: 3021-3028.

Avanzi JC, Silva MLN, Curi N, Norton LD, Beskow S, Martins SG. Spatial distribution of water erosion risk in a watershed with eucalyptus and Atlantic forest. *Ci Agrotec*. 2013; 37: 427-434.

Avanzi JC, Silva MLN, Oliveira AH, Silva MA, Curi N, Pereira PH, editor. Pilot plan on groundwater recharge. In: Bilibio C, Hensel O, Selbach JF (Ed.). *Sustainable water management in the tropics and subtropics - and case studies in Brazil*. Jaguarão: Fundação Universidade Federal do Pampa, UNIKASSEL, PGCult-UFMA. 2011. p. 207-228.

Babault J, Bonnet S, Crave, van Den Driessche J. Influence of piedmont sedimentation on erosion dynamics of an uplifting landscape: an experimental approach. *Geology*. 2004; 33: 301-304.

Balbino LC, Cordeiro LAM, Marchão RL, Santos JCF, Santos GG, Eberhardt DN, Becquer T, Silva FAM, Vilela L. Manejo de solos em sistemas de integração lavoura-pecuária e lavoura-pecuária-floresta. In: Bertol I, De Maria IC, Souza LS. (Ed.). *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa: SBCS. 2019. p. 1184-1217.

Balek J, Blahůt J. A critical evaluation of the use of an inexpensive camera mounted on a recreational unmanned aerial vehicle as a tool for landslide research. *Landslides*. 2017; 14: 1217-1224.

Batista PVG, Davies J, Silva MLN, Quinton JN. On the evaluation of soil erosion models: Are we doing enough? *Earth-Sci Rev*. 2019; 197: 102898.

Batista PVG, Laceby JP, Silva MLN, Tassinari D, Bispo DFA, Curi N, Davies J, Quinton JN. Using pedological knowledge to improve sediment source apportionment in tropical environments. *J Soils Sediments*. 2018; 19: 3274-3289.

Batista PVG, Laceby JP, Davies J, Carvalho TS, Tassinari D, Silva MLN, Curi N, Quinton JN. A framework for testing large-scale distributed soil erosion and sediment delivery models: Dealing with uncertainty in models and the observational data. *Environ Model Soft*. 2021; 137: 104961.

Batista PVG, Silva MLN, Silva BPC, Curi N, Bueno IT, Acérbi Júnior FW, Davies J, Quinton J. Modelling spatially distributed soil losses and sediment yield in the upper Grande River Basin – Brazil. *Catena*. 2017; 157: 139-150.

Bemis SP, Micklethwaite S, Turner D, James MR, Akciz S, Thiele ST, Ali Bangash H. Ground-based and UAV-Based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *J Struct Geol*. 2014; 69: 163-178.

- Beniaich A, Silva MLN, Avalos FAP, Menezes MD, Cândido BM. Determination of vegetation cover index under different soil management systems of cover plants by using an unmanned aerial vehicle with an onboard digital photographic camera. *Semina: Ci Agr.* 2019; 40: 49-66.
- Beniaich A, Silva MLN, Guimarães DV, Bispo DFA, Avanzi JC, Curi N, Pio R, Dondeyne S. Assessment of soil erosion in olive orchards (*Olea europaea* L.) under cover crops management systems in the tropical region of Brazil. *Rev Bras Cienc Solo.* 2020; 44: e0190088.
- Beniaich A. Water erosion in olive orchards under different cover crops: field experiments from tropical Brazil [tese]. Lavras: Universidade Federal de Lavras; 2018.
- Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, Schlunegger F. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surf Proc Land.* 2010; 35: 1456-1467.
- Bernardi ACC, Pitrat T, Rabello LM, Pezzopane JRM, Bosi C, Mazzuco GG, Bettiol GM. Differences in soil electrical resistivity tomography due to soil water contents in an integrated agricultural system. *Pesq Agropec Bras.* 2019; 54: e00774.
- Bird S, Hogan D, Schwab J. Photogrammetric monitoring of small streams under a riparian forest canopy. *Earth Surf Proc Land.* 2010; 35: 952-970.
- Bispo DFA, Batista PVG, Guimarães DV, Silva MLN, Curi N, Quinton J. Monitoring land use impacts on sediment production: a case study of the pilot catchment from the Brazilian program of Payment for Environmental Services. *Rev Bras Cienc Solo.* 2020; 44: e0190167.
- Bispo DFA, Silva MLN, Marques JJGSM, Bechmann M, Batista PVG, Curi N. Phosphorus transfer at a small catchment in southeastern Brazil: distributed modelling in different land use scenarios. *Ci Agrotec.* 2017; 41: 565-579.
- Blackmore BS, Larscheid G. Strategies for managing variability. In: *European Conference on Precision Agriculture.* 1997.1., Warwick, 1997. Proceedings... London: Bios Scientific. 1997. p.851-859.
- Blanco-Canqui H, Stalker AL, Shaver RTM, Drewnoski ME, van Donk S, Kibet L. Does cattle grazing and baling of corn residue increase water erosion? *Soil Sci Soc Am J.* 2016; 80: 168-177.
- Borges CS, Weindorf DC, Carvalho GS, Guilherme LRG, Takayama T, Curi N, Lima GJEO, Ribeiro BT. Foliar elemental analysis of Brazilian crops via portable X-ray fluorescence spectrometry. *Sensors.* 2020a; 20: 2509-2525.
- Borges CS, Weindorf DC, Nascimento DC, Curi N, Guilherme LRG, Carvalho GS, Ribeiro BT. Comparison of portable X-ray fluorescence spectrometry and laboratory-based methods to assess the soil elemental composition: Applications for wetland soils. *Environ Technol Inno.* 2020b; 19: 1-11.
- Brasília. Conferencia Governança do Solo: Carta de Brasília. *B Inf SBCS.* 2015; 40: 14-15.
- Brasington J, Smart RMA. Close range digital photogrammetric analysis of experimental drainage basin evolution. *Earth Surf Proc Land.* 2003; 28: 231-247.
- Brasington J. From grain to floodplain: hyperscale models of braided rivers. *J Hydraul Res.* 2010; 48: 52-53.

- Cândido BM, Quinton JN, James MR, Silva MLN, Carvalho TS, Lima W, Beniaich A, Eltner A. High-resolution monitoring of diffuse (sheet or interrill) erosion using structure-from-motion. *Geoderma*. 2020 a; 375: 114477.
- Cândido BM, James M, Quinton J, Lima W, Silva MLN. Sediment source and volume of soil erosion in a gully system using UAV photogrammetry. *Rev Bras Cienc Solo*. 2020; 44: e0200076.
- Castillo C, Pérez R, James MR, Quinton JN, Taguas EV, Gómez JA. Comparing the accuracy of several field methods for measuring gully erosion. *Soil Sci Soc Am J*. 2012; 76:1319-1332.
- Cevallos LNM, Garcia JLR, Suarez BIA, Gonzalez CAL, Gonzalez IS, Campo verde JAY, Guzman JAM, Toulkeridis T. A NDVI Analysis contrasting different spectrum data methodologies applied in pasture crops previous grazing - A case study from Ecuador. 5th International Conference on eDemocracy and eGovernment; Junho 2018; Quito. Quito: ICEDEG. 2018. p.126-135.
- Chandler J, Ashmore P, Paola C, Gooch M, Varkaris F. Monitoring river-channel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry. *Ann Assoc Am Geogr*. 2002; 92: 631-644.
- Chao K, Chen YR, Hruschka WR, Park B. Chicken heart disease characterization by multispectral imaging. *Appl Eng Agric*. 2001; 17(1): 99-106.
- Chen YR, Chao K, Kim MS. Machine vision technology for agricultural applications. *Comput Electron Agr*. 2002; 36: 173-191.
- Crusciol CAC, Pariz CM, Costa NR, Castilhos AM, Andreotti M, Meirelles PRL. Sistemas integrados de produção agropecuário: consórcio de culturas graníferas com forrageiras perenes tropicais. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB. (Ed.). *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: Copiart. 2018. p.145-162.
- Cucchiaro S, Fallu DJ, Zhang H, Walsh K, van Oost K, Brown AG, Tarolli P. Multiplatform-SfM and TLS data fusion for monitoring agricultural terraces in complex topographic and landcover conditions. *Remote Sens*. 2020; 12 (12): 1946.
- Dai E, Zhu J, Wang X, Xi W. Multiple ecosystem services of monoculture and mixed plantations: A case study of the Huitong experimental forest of Southern China. *Land Use Policy*. 2018; 79: 717-724.
- Day SS, Gran KB, Belmont P, Wawrzyniec T. Measuring bluff erosion part 2: pairing aerial photographs and terrestrial laser scanning to create a watershed scale sediment budget. *Earth Surf Proc Land*. 2013; 38: 1068-1082.
- Dick J, Tetzlaff D, Bradford J, Soulsby C. Using repeat electrical resistivity surveys to assess heterogeneity in soil moisture dynamics under contrasting vegetation types. *J Hydrol*. 2018; 559: 684-697.
- Dota MA, Santos IM, Cugnasca CE. Fusão de sensores na agricultura de precisão. In: Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão; 2010; Ribeirão Preto. Ribeirão Preto: SBEA. 2010. p.1-10.

Eli-Chukwu NC. Applications of artificial intelligence in agriculture applications of artificial intelligence in agriculture: a review. *Eng Technol Appl Sci Res.* 2019; 9: 4377-4383.

Eltner A, Maas H-G, Faust D. Soil micro-topography change detection at hillslopes in fragile Mediterranean landscapes. *Geoderma.* 2018; 313: 217-232.

Farias PRS, Nociti LAS, Barbosa JC, Perecin D. Agricultura de precisão: mapeamento da produtividade em pomares cítricos usando geoestatística. *Rev Bras Frutic.* 2003; 25: 235-41.

Feng X, Zhang H, Yu P. X-ray fluorescence application in food, feed, and agricultural science: a critical review. *Crit Rev Food Sci Nutr.* 2021; 61(14): 2340-2350.

Food and Agriculture Organization.FAO. An international consultation on integrated crop-livestock systems for development: The way forward for sustainable production intensification. Rome: FAO. 2010. 64p.

Felix FC, Avalos FAP, Lima W, Cândido BM, Silva MLN, Mincato RL. Seasonal behavior of vegetation determined by sensor on an unmanned aerial vehicle. *An Acad Bras Cienc.* 2021; 93: e20200712.

Food and Agriculture Organization. FAO. Fao statistical yearbook 2013 world food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome: Romep. 2013; 307- 289p.

Franzuebbers AJ, Sawchik J, Taboada MA. Agronomic and environmental impacts of pasture–crop rotations in temperate North and South America. *Agr Ecosyst Environ.* 2014; 190: 18-26.

Freitas DAF, Silva MLN, Cardoso EL, Curi N. Soil quality indexes under different forestry and adjacent native scrubland use and management systems. *Rev Ciênc Agron.* 2012; 43: 417-428.

Freitas DAF, Silva MLN, Curi N, Silva MA, Oliveira AH, Silva SHG. Physical indicators of soil quality in oxisols under Brazilian cerrado. In: Soriano MCH (Ed.). *Soil processes and current trends in quality assessment.* Rijeka: InTech DTP team; 2013. p.87-110.

Gessesse GD, Fuchs H, Mansberger R, Klik A, Rieke-Zapp DH. Assessment of erosion, deposition and rill development on irregular soil surfaces using close range digital photogrammetry. *Photogramm Rec.* 2010; 25: 299-318.

Goetz J, Brenning A, Marcer M, Bodin X. Modeling the precision of structure-from-motion multi-view stereo digital elevation models from repeated close-range aerial surveys. *Remote Sens Environ.* 2018; 210: 208-216.

Gracia-Romero A, Vergara-Diaz O, Thierfelder C, Cairns JE, Kefauver SC, Araus JL. Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe. *Remote Sens.* 2018; 10 (2):349.

Guerra MBB, Adame A, Almeida E, Brasil MAS, Schaefer CEGR, Krug FJ. In situ determination of K, Ca, S and Si in fresh sugar cane leaves by handheld energy dispersive X-ray fluorescence spectrometry. *J Braz Chem Soc.* 2018; 29: 1086-1093.

Guo M, Shi H, Zhao J, Liu P, Welbourne D, Lin Q. Digital close range photogrammetry for the study of rill development at flume scale. *Catena.* 2016; 43: 265-274.

- Harwin S, Lucieer A. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sens.* 2012; 4: 1573-1599.
- Heng BCP, Chandler JH, Armstrong A. Applying close-range digital photogrammetry and soil erosion studies. *Photogramm Rec.* 2010; 25: 240-265.
- Hilimire, K. Integrated crop/livestock agriculture in the United States: a review. *J Sustain Agric.* 2011; 35: 376-93.
- Hoffmann CA, Sarturi JO, Weindorf DC, Henry DD, Ramirez-Ramirez HA, Jackson S, Ballou MA, Sandes MD, Bouyi L. The use of portable X-ray fluorescence spectrometry to measure apparent total tract digestibility to measure apparent total tract digestibility in beef cattle and sheep. *J Anim Sci.* 2020; 98:skaa048.
- Höfle B, Rutzinger M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: a technological perspective. *Z Geomorphol.* 2011; 55: 1-29.
- Hohenthal J, Alho P, Hyyppä J, Hyyppä H. Laser scanning applications in fluvial studies. *Prog Phys Geogr.* 2011; 35: 782-809.
- Hugenholtz CH, Walker J, Brown O, Myshak S. Earthwork volumetrics with an unmanned aerial vehicle and softcopy photogrammetry. *J Surv Eng.* 2015; 141: 06014003.
- Immerzeel WW, Kraaijenbrink PDA, Shea JM, Shrestha AB, Pellicciotti F, Bierkens MFP, de Jong SM. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sens Environ.* 2014; 150: 93-103.
- James MR, Quinton JN. Ultra-rapid topographic surveying for complex environments: the hand-held mobile laser scanner (HMLS). *Earth Surf Proc Land.* 2014; 39: 138-142.
- James MR, Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surf Process Landf.* 2014; 39: 1413-1420.
- Jayawickreme DH, Santoni CS, Kim JH, Jobragy EG, Jackson RB. Changes in hydrology and salinity accompanying a century of agricultural conversion in Argentina. *Ecol Appl.* 2011; 21: 2367-2379.
- Jenkins R. X-ray fluorescence spectrometry. 2nd. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2018.
- Kim MS, Chen YR, Mehl PM. Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. *Trans ASAE.* 2001b; 44: 721-729.
- Kim MS, McMurtrey JE, Mulchi CL, Daughtry CST, Chappelle EW, Chen YR. Steady-state multispectral fluorescence imaging system for plant leaves. *Appl Optics.* 2001a; 40: 157-66.
- Lal R. Climate-strategic agriculture and the water-soil-waste nexus. *J Plant Nutr Soil Sci.* 2013; 176: 479-493.
- Lane SN. The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogramm Rec.* 2000; 16: 937-957.

- Lenz AM, Rosa HA, Mercante E, Maggi MF, Mendes IS, Cattani CEV, Johann JA. Expansion of eucalyptus energy plantations under a livestock-forestry integration scenario for agroindustries in western Paraná, Brazil. *Ecol Indic.* 2019; 98: 39-48.
- Lima GC, Silva MLN, Freitas DAF, Cândido BM, Curi N, Oliveira MS. Spatialization of soil quality index in the Sub-Basin of Posses, Extrema, Minas Gerais. *R Bras Eng Agríc Ambiental.* 2016; 20: 78-84.
- Lima PLT, Silva MLN, Quinton JN, Armstrong A, Inda Junior AV, Poggere GC, Curi N. Tracing the origin of reservoir sediments using magnetic properties in Southeastern Brazil. *Semina: Ci Agr.* 2020; 41: 847-864.
- Lima PLT, Silva MLN, Quinton JN, Batista PVG, Cândido BM, Curi N. Relationship Among Crop Systems, Soil Cover, and Water Erosion on a Typic Hapludox. *Rev Bras Cienc Solo.* 2018; 42: e0170081.
- Lima PLT, Silva MLN, Curi N, Quinton JN. soil loss by water erosion in areas under maize and jack beans intercropped and monocultures. *Ciênc Agrotec.* 2014; 38: 2129-139.
- Lima TM, Weindorf DC, Curi N, Guilherme LRG, Lana RMQ, Ribeiro BT. Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. *Geoderma.* 2019; 353: 264-272.
- Lopes DC, Steidle Neto AJ. Recent advances on agricultural software: A review. *Agr Res Technol.* 2011; 139-69.
- Margui E, van Grieken R. X-ray fluorescence spectrometry and related techniques: an introduction. New York: Momentum Press. 2013.
- Marinoudi V, Sørensen CG, Pearson S, Bochtis, D. Robotics and labour in agriculture. A contexto consideration. *Biosyst Eng.* 2019; 184: 111-1121.
- Marques JJGSM, Curi N, Ferreira MM, Lima JM, Silva MLN, Sá MAC. Adequacy of indirect methods to estimate the erodibility of soils with argillic horizon in Brazil. *Rev Bras Cienc Solo.* 1997a; 21: 447-456.
- Marques JJGSM, Curi N, Lima JM, Ferreira MM, Silva MLN, Ferreira DF. Estimation of erodibility from attributes of soils with argillic horizon in Brazil. *Rev Bras Cienc Solo.* 1997b; 21: 457-465.
- Marzoff I, Poesen J. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology.* 2009; 111; 48-60.
- Mello CR, Viola MR, Beskow S, Norton LD. Multivariate models for annual rainfall erosivity in Brazil. *Geoderma.* 2013; 202-203: 88-102.
- Melo LBB, Silva BM, Peixoto DS, Chiarini, TPA, Oliveira GC, Curi N. Effect of compaction on the relationship between electrical resistivity and soil water content in Oxisol. *Soil Till Res.* 2021; 208: 104876.
- Molin JP, Tavares TR. Sensor systems for mapping soil fertility attributes: Challenges, advances, and perspectives in brazilian tropical soils. *Eng Agríc.* 2019; 39: 126-147.

- Moraes A, Carvalho PCF, Anghinoni I, Lustosa SC, Costa SEVGA, Kunrath TR. Crop-livestock integration in Brazilian subtropics II. In: Proceedings International Symposium on Integrated Crop-Livestock Systems [CD ROM]; Porto Alegre; 2012. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2012.
- Moraes A, Carvalho PCF, Pelissari A, Anghinoni I, Lustosa SBC, Lang CR, Assmann TS, Deiss L, Nunes PAA. Sistemas integrados de produção agropecuária: conceitos básicos e histórico no Brasil. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB. Editores. Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil. Tubarão: copiar; 2018. p.13-28.
- Moreira MC, Cecílio RA, Pinto FAC, Pruski FF. Desenvolvimento e análise de uma rede neural artificial para estimativa da erosividade da chuva para o Estado de São Paulo. *Rev Bras Cienc Solo*. 2006; 30: 1069-1074.
- Moreira MC, Oliveira TEC, Cecilio RA, Pinto FAC, Pruski FF. Spatial Interpolation of Rainfall Erosivity Using Artificial Neural Networks for Southern Brazil Conditions. *Rev Bras Cienc Solo*. 2016; 40: e0150132.
- Moreira MC, Pruski FF, Oliveira TEC, Pinto FAC, Silva DD. NetErosividade MG: erosividade da chuva em Minas Gerais. *Rev Bras Cienc Solo*. 2008; 32: 1349-1353.
- Munnaf MA, Haesaert G, van Meirvenne M, Mouazen AM. Site-specific seeding using multi-sensor and data fusion techniques: A review. *Adv Agron*. 2020; 161: 241-23.
- Nayak AK, Rahman MM, Naidu R, Dhal B, Swain CK, Nayak AD, Tripathi R, Shahid M, Islam MR, Pathak H. Current and emerging methodologies for estimating carbono sequestration in agricultural soils: A review. *Sci Total Environ*. 2019; 665: 890-912.
- Neves CMN, Silva MLN, Curi N, Cardoso EL, Macedo RLG, Ferreira MM, Souza FS. Indicator attributes of soil quality in agri-forestry-pasture system at Northwestern of Minas Gerais State, Brazil. *Sci For*. 2007; 74: 45-53.
- Neves CMN, Silva MLN, Curi N, Macedo RLG, Moreira FMS, D'Andréa AF. Biological indicators of soil quality in agricultural-forestry-pasture system in northwest region of Minas Gerais state, Brazil. *Ci Agrotec*. 2009; 33: 105-112.
- Nouwakpo SK, Huang CH. A simplified close-range photogrammetric technique for soil erosion assessment. *Soil Sci Soc Am J*. 2012; 76: 70-84.
- Nouwakpo SK, James MR, Weltz MA, Huang CH, Chagas I, Lima L. Evaluation of structure from motion for soil microtopography measurement. *Photogramm Rec*. 2014; 29: 297-316.
- O'Connor J, Smith MJ, James MR. Cameras and settings for aerial surveys in the geosciences: Optimising image data. *Prog Phys Geogr*. 2017; 41: 325-344.
- OLDEMAN LR. The global extent of soil degradation. In: Soil Resiliense and sustainable Land Use. Greenland DJ, Szabocls I (Ed.). Cab International, Wallingford, UK. 1994. p. 99-118.
- Oliveira AH, Silva MA, Silva MLN, Curi N, Neto GK, Freitas DAF. Development of topographic factor modeling for application in soil erosion models. In: Soriano MCH (Ed.). Soil processes and current trends in quality assessment. Rijeka: InTech DTP team; 2013a. p.111-138.

- Oliveira AH, Silva MLN, Curi N, Avanzi JC, Neto GK, Araújo EF. Water erosion in soils under eucalyptus forest as affected by development stages and management systems. *Ci Agrotec*. 2013b; 37: 159-169.
- Oliveira AH, Silva MLN, Curi N, Klinke Neto G, Silva MA, Araújo EF. Hydrological consistency of digital elevation models to define drainage network in the subbasin of the Terra Dura forest stand in Eldorado do Sul, RS. *Rev Bras Cienc Solo*. 2012; 36 (4): 1259-1268.
- Panagos P, Katsoyiannis A. Soil erosion modelling: The new challenges as the result of policy developments in Europe. *Environ Res*. 2019; 172: 470-474.
- Paul Obade V, Lal R. Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma*. 2016; 265: 96-102.
- Peixoto DS, Silva BM, Godinho Silva SH, Karlen DL, Moreira SG, da Silva AAP, Resende AV, Norton LD, Curi N. Diagnosing, Ameliorating, and Monitoring Soil Compaction in No-Till Brazilian Soils. *Agrosyst Geosci Environ*. 2019a; 2: 1-14.
- Peixoto DS, Silva BM, Oliveira GD, Moreira SG, da Silva F, Curi N. A soil compaction diagnosis method for occasional tillage recommendation under continuous no tillage system in Brazil. *Soil Till Res*. 2019b; 194: 104307.
- Peixoto DS, Silva BM, Melo LBB, Moreira SG. Soil electrical resistivity as indicator of changes caused by occasional tillage in continuous no-tillage system. In: *Annals of 5th Brazilian Soil Physics Meeting; Lavras*. Lavras: UFLA; 2019c.
- Pelegriño MHP, Weindorf DC, Silva SHG, Menezes MD, Poggere GC, Guilherme LRG, Curi N. Synthesis of proximal sensing, terrain analysis, and parent material information for available micronutrient prediction in tropical soils. *Precis Agric*. 2018; 19: 1-21.
- Piccoli I, Furlan L, Lazzaro B, Morari F. Examining conservation agriculture soil profiles: Outcomes from northeastern Italian silty soils combining indirect geophysical and direct assessment methods. *Eur J Soil Sci*. 2019. p. 1-12.
- Pimentel D. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environ Dev Sustain*. 2006; 8:119-137.
- Porfirio-da-Silva V. O componente arbóreo em sistemas integrados de produção agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB. (Ed.). *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: copiar. 2018. p.163-186.
- Ravansari R, Wilson SC, Tighe M. Portable X-ray fluorescence for environmental assessment of soils: Not just a point and shoot method. *Environ Int*. 2019; 134: 105250.
- Resende AV, Brandão, ZN, Grego CR, Borghi, E, Wilda LRM. Manejo do solo sob o enfoque da agricultura de precisão. In: Bertol I, De Maria IC, Souza LS. (Ed.). *Manejo e conservação do solo e da água*. Viçosa: SBCS. 2019. p.1220-1270.
- Ribeiro BT, Silva SHG, Silva EA, Guilherme LRG. Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. *Ci Agrotec*. 2017; 41: 245-254.

- Ribeiro BT, Weindorf DC, Silva BM, Tassinari D, Amarante LC, Curi N, Guilherme LRG. The influence of soil moisture on oxide determination in tropical soils via portable X-ray fluorescence. *Soil Sci Soc Am J.* 2018; 3: 632-644.
- Rieke-Zapp DH, Nearing MA. Digital close-range photogrammetry for measurement of soil erosion. *Photogramm Rec.* 2005; 20: 69-87.
- Romano N. Soil moisture at local scale: Measurements and simulations. *J Hydrol.* 2014; 516: 6-20.
- Saad SI, Silva JM, Silva MLN, Guimarães JLB, Sousa Junior WC, Figueiredo RO, Rocha HR. Analyzing ecological restoration strategies for water and soil conservation. *Plos One.* 2018; 13: e0192325.
- Saad SI, Silva JM, Ponette-González AG, Silva MLN, Rocha HR. Modeling the on-site and off-site benefits of Atlantic forest conservation in a Brazilian watershed. *Ecosyst Serv.* 2021; 48101260.
- Saiz-Rubio V, Rovira-Más F. From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agron.* 2020; 10(207): 1-21.
- Santos WJR, Silva BM, Oliveira GC, Volpato MML, Lima JM, Curi N, Marques João J. Soil moisture in the root zone and its relation to plant vigor assessed by remote sensing at management scale. *Geoderma.* 2014; 221: 91-95.
- Silva BM, Oliveira GC, Serafim ME, Silva Júnior JJ, Colombo A, Lima JM. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. *Pesq Agropec Bras.* 2012; 47: 277-286.
- Silva BM, Silva SHG, Oliveira GC, Peters PHCR, Santos WJR, Curi N. Soil moisture assessed by digital mapping techniques and its field validation. *Ci Agrotec.* 2014a; 38:140-148.
- Silva BPC, Silva MLN, Avalos FAP, Menezes MD, Curi N. Digital soil mapping including additional point sampling in Posses ecosystem services pilot watershed, southeastern Brazil. *Sci Rep.* 2019a; 9:13763.
- Silva BPC, Silva MLN, Batista PVG, Pontes LM, Araújo EF, Curi N. Soil and water losses in eucalyptus plantation and natural forest and determination of the USLE factors at a pilot sub-basin in Rio Grande do Sul, Brazil. *Ci Agrotec.* 2016; 40: 432-442.
- Silva BPC, Tassinari D, Silva MLN, Silva BM, Curi N, Rocha HR. Nonlinear models for soil moisture sensor calibration in tropical mountainous soils. *Sci Agric.* 2022; 79(4): e20200253.
- Silva EA, Weindorf DC, Silva SHG, Ribeiro BT, Poggere GC, Carvalho TS, Gonçalves MGM, Guilherme LRG, Curi N. Advances in tropical soil characterization via portable X-ray fluorescence spectrometry. *Pedosphere.* 2019b; 29: 468-482.
- Silva LBN, Silva MLN, Batista PVG, Lima DA, Neto AM. Developing an unmanned air vehicle deployed sensor platform for studying atmospheric emissions of soil carbon dioxide. In: 21 World Congress of Soil Science; Rio de Janeiro. Viçosa: IUSS/SLCS/SBCS; 2018. <https://www.21wcso.org>.
- Silva MA, Freitas DAF, Silva MLN, Oliveira AH, Lima GC, Curi N. Geographic information system on the land use planning. *Rev Bras Cienc Agrar.* 2013; 8: 316-323.

Silva MA, Silva MLN, Curi N, Oliveira AH, Avanzi JC, Norton LD. Water erosion risk prediction in eucalyptus plantations. *Ci Agrotec*. 2014b; 38: 160-172.

Silva MA, Silva MLN, Curi N, Santos GR, Marques JJGSM, Menezes MD, Leite FP. Evaluation and spatialization of rainfall erosivity in the rio Doce Valley, Central-Eastern region of Minas Gerais, Brazil. *Rev Bras Cienc Solo*. 2010; 34: 1029-1039.

Silva MLN, Avalos FAP, Lima W, Poggere GC, Curi N. Diagnóstico e recomendação de práticas conservacionistas do solo e da água, em áreas cultivadas com tabaco, fazenda Mafra – Souza Cruz. Mafra: Souza Cruz. 2017. 28p.

Silva MLN, Curi N, Ferreira MM, Lima JM, Ferreira DF. Proposition of models for erodibility estimation of Brazilian oxisols. *Pesq Agropec Bras*. 1999; 34: 2287-2298.

Silva MLN, Curi N, Lima JM, Ferreira MM. Evaluation of indirect methods for determination of erodibility of Brazilian latosols (oxisols). *Pesq Agropec Bras*. 2000; 35: 1207-1220.

Silva MLN, Curi N. Uso e conservação do solo e da água e crise energética: reflexões e exemplos em Minas Gerais. *Bol Inf SBCS*. 2001; 26: 10-13.

Silva MLN, Quinton JN, Cândido BM, Curi N, Batista PVG, Cardoso P, Avalos FA, Davies J. (R)USLE factors obtained in standard plots: a critical analysis, opportunities and challenges related to the database in Brazil. In: *Proceedings of the Global Symposium on Soil Erosion*. 2019; Roma. Rome: FAO; 2019c. p.279-283.

Silva SHG, Ribeiro BT, Guerra MBB, Carvalho HWP, Lopes G, Carvalho GS, Guilherme LRG, Resende M, Mancini M, Curi N, Rafael RBA, Cardelli V, Cocco S, Corti G, Chakraborty S, Li B, Weindorf DC. pXRF in tropical soils: methodology, applications, achievements and challenges. *Adv Agron*. 2021; 167: 1-62.

Silva SHG, Weindorf DC, Pinto LC, Faria WM, Acerbi Junior FW, Gomide LR, Mello JM, Pádua Junior AL, Souza IA, Teixeira AFS, Guilherme LRG, Curi N. Soil texture prediction in tropical soils: A portable X-ray fluorescence spectrometry approach. *Geoderma*. 2020; 362: 114136.

Siqueira Junior P, Silva MLN, Cândido BM, Avalos FAP, Batista PVG, Curi N, Lima W, Quinton JN. Assessing water erosion processes in degraded area using unmanned aerial vehicle imagery. *Rev Bras Cienc Solo*. 2019; 43: e0190051.

Soares AB, Missio RL, Schmitt D, Beffart R, Deifeld FLC. Componente animal em sistemas integrados de produção agropecuária. In: Souza ED, Silva FD, Assmann TS, Carneiro MAC, Carvalho PCF, Paulino HB. Editores. *Sistemas integrados de produção agropecuária no Brasil*. Tubarão: copiar. 2018. p.187-210.

Stöcker C, Eitner A, Karrasch P. Measuring gullies by synergetic application of UAV and close range photogrammetry – A case study from Andalusia, Spain. *Catena*. 2015; 132: 1-11.

Teixeira AF, Pelegrino MHP, Faria WM, Silva SHG, Gonçalves MGM, Acerbi Júnior FW, Gomide LR, Pádua Júnior AL, Souza IA, Chakraborty S, Weindorf DC, Guilherme LRG, Curi N. Tropical soil pH and sorption complex prediction via portable X-ray fluorescence spectrometry. *Geoderma*. 2020; 361: 114132.

Teixeira AFS, Weindorf DC, Silva SHG, Guilherme LRG, Curi N. Portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry applied to the prediction of chemical attributes in Inceptisols under different land uses. *Ci Agrotec*. 2018; 42: 501-512.

Thomas DT, Moore AD, Bell, LW, Webb NP. Ground cover, erosion risk and production implications of targeted management practices in Australian mixed farming systems: Lessons from the Grain and Graze program. *Agric Systems*. 2018; 162: 123-35.

Tiecher T, Ramon R, Lacey JP, Evrard O, Minella JPG. Potential of phosphorus fractions to trace sediment sources in a rural catchment of Southern Brazil: Comparison with the conventional approach based on elemental geochemistry. *Geoderma*. 2019; 337: 1067-76.

US Environmental Protection Agency - USEPA. Method 6200 – Field portable X-ray fluorescence spectrometry for the determination of elemental concentrations in soil and sediment [Internet]. 2007 [acesso em 17 Fevereiro 2020]. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/6200.pdf>

Vanella D, Cassiani G, Busato L, Boaga J, Barbagallo S, Binley A, Consoli S. Use of small scale electrical resistivity tomography to identify soil-root interactions during deficit irrigation. *J Hydrol*. 2018; 556: 310-324.

Vereecken H, Huisman JA, Pachepsky Y, Montzka C, Van Der Kruk J, Bogaen H, Weihermüller L, Herbst M, Martinez G, Vanderborgh T J. On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *J Hydrol*. 2014; 516: 76-96.

Vincent DR, Deepa N, Elavarasan D, Srinivasan K, Chauhdary SH, Iwendi C. Sensors driven AI-based agriculture recommendation model for assessing land suitability. *Sensors*. 2019; 19: 3667.

Vinci A, Brigante R, Todisco F, Mannocchi F, Radicioni F. Measuring rill erosion by laser scanning. *Catena*. 2015; 124: 97-108.

Wang B, Zheng F, Römkens MJM, Darboux F. Soil erodibility for water erosion: A perspective and Chinese experiences. *Geomorphology*. 2013; 187: 1-10.

Weindorf DC, Bakr N, Zhu Y. Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. *Adv Agron*. 2014; 128: 1-45.

Weindorf DC, Chakraborty S. Portable X-ray fluorescence spectrometry analysis of soils. In: Hirmas D. (Ed.). *Methods of Soil Analysis*. Soil Sci Soc Am J. 2016; 1-8.

World Health Organization, UNICEF. Progress on sanitation and drinking water: 2015 Update and millennium development goals assessment. World health organization, UNICEF, Division of communication, 3 United nations plaza, New York 10017, USA. 2015.

Zhang J, Huang Y, Pu R, Gonzalez-Moreno P, Yuan L, Wu K, Wu, Huang W. Monitoring plant diseases and pests through remote sensing technology: A review. *Comp Electr Agric*. 2019; 165: 104943.