



OBJETIVOS DE
DESENVOLVIMENTO
SUSTENTÁVEL

Mega tendências

da Ciência do Solo 2030

Livia Abreu Torres
Silvia Kanadani Campos
Editoras Técnicas



Mega tendências

da Ciência do Solo 2030

Livia Abreu Torres
Silvia Kanadani Campos
Editoras Técnicas

Embrapa

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Megatendências da Ciência do Solo 2030

*Lívia Abreu Torres
Sílvia Kanadani Campos*

Editoras técnicas

Embrapa
Brasília, DF
2022

Embrapa Solos

Rua Jardim Botânico, 1024.

Jardim Botânico, Rio de Janeiro, RJ - CEP: 22460-000

Fone: + 55 (21) 2179-4500

www.embrapa.br

www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Unidade responsável pelo conteúdo e edição

Embrapa Solos

Comitê Local de Publicações

Presidente: *Silvio Barge Bhering*

Secretário-Executivo: *Marcos Antônio Nakayama*

Membros: *Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pedreira, David Vilas Boas de Campos, Evaldo de Paiva Lima, José Francisco Lumbreras, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Lucia Raquel Queiroz Pereira da Luz, Maurício Rizzato Coelho, Wenceslau Geraldes Teixeira*

Supervisão editorial: *Marcos Antônio Nakayama*

Normalização bibliográfica: *Luciana Sampaio de Araujo (CRB-7/5165)*

Projeto gráfico da coleção: *Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica: *Alexandre Abrantes Cotta de Mello*

Capa: *Eduardo Guedes de Godoy*

1ª edição

E-book (2022)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Solos

Megatendências da Ciência do Solo 2030 / Lívia Abreu Torres, Silvia Kanadani Campos,
editoras técnicas. – Brasília, DF : Embrapa, 2022.

E-book : il. color.

E-book no formato ePub.

ISBN 978-65-87380-86-5

1. Solo. 2. Pedologia. 3. Agricultura Sustentável. 4. Meio Ambiente. 5. Tecnologia. I.
Torres, Lívia Abreu. II. Campos, Silvia Kanadani. III. Embrapa Solos.

CDD 631.4

Luciana Sampaio de Araujo (CRB-7/5165)

© Embrapa, 2022

Autores

Ademir Fontana

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Alba Leonor da Silva Martins

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Ana Paula Dias Turetta

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

André Júlio do Amaral

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Solo, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

Azeneth Eufrausino Schuler

Engenheira florestal, doutora em Ciências/Energia Nuclear na Agricultura, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pereira

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Cláudio Lucas Capeche

Engenheiro-agrônomo, mestre em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Cynthia Cury

Advogada, mestre em Gestão e Políticas Públicas, analista da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa, Brasília, DF

Daniel Vidal Perez

Agrônomo, doutor em Química Analítica, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Édson Luis Bolfe

Engenheiro florestal, doutor em Geografia, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Fabiane Machado Vezzani

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciência do Solo, docente Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR

Fabiano de Carvalho Balieiro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Felipe de Assis Cardoso

Cientista Social, especialista em Gestão Pública, analista da Embrapa, Brasília, DF

Gizelle Cristina Bedendo

Química, doutora em Química Analítica, analista na Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Guilherme Salgado

Engenheiro ambiental e analista de Pesquisa Energética na EPE - Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, RJ

Gustavo de Mattos Vasques

Engenheiro florestal, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Helga Restum Hissa

Engenheira-agrônoma, Doutora em Políticas Públicas, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Jerri Edson Zilli

Agrônomo, doutor em Agronomia-Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ

Joice Nunes Ferreira

Bióloga, doutora em Ecologia, pesquisadora da Embrapa Amazônia Oriental, Belém, PA

José Carlos Polidoro

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

José Eloir Denardin

Agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

José Francisco Lumbreras

Engenheiro-agrônomo, doutor em Planejamento e Gestão Ambiental, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Joyce Maria Guimarães Monteiro

Engenheira-agrônoma, doutora em Planejamento Energético, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Julia Franco Stuchi

Engenheira florestal, doutoranda em Recursos Naturais e Gestão Sustentável, analista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Junior Ruiz Garcia

Economista, doutor em Desenvolvimento Econômico, Espaço e Meio Ambiente, professor do Departamento de Economia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR

Lívia Abreu Torres

Relações públicas, mestra em Marketing e em Administração Estratégica, analista da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa, Brasília, DF

Luis Carlos Hernani

Engenheiro-agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Marcio Mattos de Mendonça

Engenheiro-agrônomo, mestre em Agronomia, coordenador do Programa de Agricultura Urbana da AS-PTA Agricultura Familiar e Agroecologia, Rio de Janeiro, RJ

Marcos Aurélio Santiago Françoço

Cientista Político, mestre em Relações Internacionais, Analista de Inteligência da Embrapa, Brasília, DF

Margareth Gonçalves Simões

Engenheira civil, doutora em Geografia, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Mariella Camardelli Uzêda

Engenheira-agrônoma, doutora em Engenharia Agrícola, pesquisadora da Embrapa Agrobiologia, Rio de Janeiro, RJ

Mauricio Rizzato Coelho

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Mônica Matoso Campanha

Engenheira-agrônoma, doutora em Fitotecnia, pesquisadora Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, MG

Otávio Valentim Balsadi

Engenheiro-agrônomo, doutor em Economia Aplicada, pesquisador da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa, Brasília, DF

Paulo César Teixeira

Agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Paulo de Camargo Duarte

Médico Veterinário, doutor em Epidemiologia, pesquisador da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa, Brasília, DF

Pedro Luiz de Freitas

Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rachel Bardy Prado

Bióloga, doutora em Ciências da Engenharia Ambiental, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Ricardo De Oliveira Dart

Geógrafo, mestre em Geografia, analista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz

Engenheiro-agrônomo, doutor em Ciências do Meio Ambiente, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Rosângela Straliotto

Engenheira-agrônoma, doutora em Ciências do Solo, pesquisadora da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Silmara Rossana Bianchi

Química, doutora em Química Analítica, analista da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Silvia Kanadani Campos

Médica-veterinária, doutora em Economia Aplicada, pesquisadora da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas da Embrapa, Brasília, DF

Silvia Marie Ikemoto

Bióloga, doutora em Meio Ambiente, gerente de gestão do território e informações geoespaciais do INEA, Rio de Janeiro, RJ

Thomaz Fronzaglia

Engenheiro-agrônomo, doutor em Política Científica e Tecnológica, analista da Secretaria de Inteligência e Relações Estratégicas, Embrapa Sede, Brasília-DF

Vanderlise Giongo

Engenheira-agrônoma, Doutora em Ciência do Solo. pesquisadora da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS

Vinicius de Melo Benites

Agrônomo, doutor em Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Wenceslau Geraldes Teixeira

Engenheiro-agrônomo, doutor em Geoecologia, pesquisador da
Embrapa Solos, Rio de Janeiro, RJ

Comitê técnico e colaboradores

Comitê técnico

Aline Pacobahyba de Oliveira
Daniel Vidal Perez
Elaine Cristina Cardoso Fidalgo
Fabiano de Carvalho Balieiro
Guilherme Kangussú Donagemma
Gustavo de Mattos Vasques
José Carlos Polidoro
Marcos Antônio Nakayama
Margareth Gonçalves Simões
Mauricio Rizzato Coelho
Paulo César Teixeira
Petula Nascimento Ponciano
Rachel Bardy Prado
Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz
Rosângela Stralioetto
Silvio Barge Bhering
Vinicius de Melo Benites

Colaboradores

Aluísio Granato de Andrade
André Marcelo de Souza
Bianca Braz Mattos
Braz Calderano Filho
Caio Inácio de Teves

David Vilas Boas de Campos
Eliane de Paula Clemente
Enio Fraga da Silva
Giani Tavares Santos da Silva
Jesus Fernando Mansilla Baca
Maria Ortiz Almeida Baptista Portes
Maria Regina Capdeville Laforet
Ricardo Trippia dos Guimarães Peixoto
Silvio Roberto de Lucena Tavares
Waldir de Carvalho Junior

Sumário

Introdução

Parte 1 - A Ciência do Solo: histórico e forças motrizes

Capítulo 1. A ciência do solo no Brasil: linha do tempo

Capítulo 2. Drivers relacionados à agricultura, ambiente e sociedade com impacto para a Ciência do Solo

Parte 2 - Megatendências para a Ciência do Solo

Capítulo 3. Convergência das tecnologias digitais e da informação

Capítulo 4. Bioeconomia e biotecnologia na Ciência do Solo

Capítulo 5. Intensificação da agricultura com sustentabilidade

Capítulo 6. Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais

Capítulo 7. Serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis

Capítulo 8. A saúde do solo

Capítulo 9. Desafios para o século XXI

Apêndice 1. Lista de respondentes

Apêndice 2. Questionário aplicado

Introdução

O objetivo deste documento é identificar um conjunto de sinais e tendências para a Ciência do Solo no horizonte 2030, consolidados em megatendências. São apresentadas as principais forças de mudanças que impulsionam importantes transformações do mundo e da agropecuária, bem como seus impactos sobre o futuro da Ciência do Solo.

Resultado de esforços iniciados em 2019, o “Megatendências da Ciência do Solo 2030” foi obtido a partir da realização de estudos prospectivos nos temas: “Pedologia e Pedometria no Século XXI”; “Reinserção de Terras Degradadas aos Sistemas de Produção Agropecuários”; “Serviços Ambientais - Políticas Públicas e Certificação”; “Fertilizantes, Condicionadores e Novas Fontes de Nutrientes para Solos Tropicais” e “O Futuro do Laboratório de Solos” .

Esses estudos, conduzidos pela equipe de pesquisa da Embrapa Solos, contaram com a colaboração de especialistas externos (Apêndice1), os quais forneceram informações sobre o futuro de cada área (questionários no Apêndice 2). Adicionalmente, foram analisados sinais e tendências de mais de 50 documentos e eventos elencados como “fontes portadoras de futuro”. Neste processo, importantes drivers de mudança do agro foram identificados, tais como: desenvolvimento demográfico, econômico, ambiental, e tecnológico, destacando temas como: comportamento do consumidor, mudança do clima, riscos agropecuários, sustentabilidade, políticas públicas e marco regulatórios. Além disso, uma avaliação transversal de todo o conteúdo apontou

convergências temáticas, que culminaram no agrupamento das informações em 06 megatendências¹ principais, conforme listado a seguir:

- **Convergência das tecnologias digitais e da informação:** aborda tendências e inovações relacionadas à integração convergente de tecnologias que têm alicerçado a agricultura digital com ênfase no domínio de conhecimento da ciência dos solos e suas aplicações, tais como: rede de sensores sem fio, internet e inteligência artificial, geotecnologias, inteligência artificial e computação de alto desempenho. Explora tendências da pedologia e pedometria no século XXI; e a importância do investimento em mapeamento do solo, destacando o Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos).
- **Bioeconomia e biotecnologia na ciência do solo:** aponta os desafios na compreensão da formação estrutural do solo e na oportunidade que a biologia apresenta neste contexto, evidenciando que o maior conhecimento das complexas associações microbianas, suas funções e atividades metabólicas representam expressivos benefícios para agricultura e meio ambiente. A relação entre biotecnologia e solos, cada vez mais evidente na agricultura moderna, é uma tendência crescente. Bioinsumos, biofábricas, resíduos agrícolas, e edição genômica, são alguns dos campos com potencial para grandes avanços futuros.
- **Intensificação da agricultura com sustentabilidade:** trata dos aspectos relacionados ao uso e conservação dos recursos naturais, em especial o solo, a água, e a pressão por processos

de produção mais sustentáveis. A prioridade por tecnologias e práticas conservacionistas que possibilitem a preservação dos elementos que compõem as terras agrícolas, ao mesmo tempo que propiciem saltos de produtividade e qualidade, também foram exploradas.

- **Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais:** a dependência de insumos, as crescentes importações de fertilizantes e os esforços para inovações são destaques nessa megatendência. O desenvolvimento de tecnologias com uso de resíduos; crescimento de ferramentas biológicas; controle das perdas de nitrogênio por volatilização e/ou lixiviação; pesquisas envolvendo os mecanismos de disponibilização de fosfatos no solo; busca de novas fontes de nutrientes provenientes de agrominerais nacionais; uso de nanotecnologia e novas ferramentas de fertilização para a agricultura de precisão são, além de tendências, oportunidades exploradas.
- **Serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis:** a rica biodiversidade brasileira representa um elevado potencial para inúmeras oportunidades de serviços ecossistêmicos e nesse contexto o solo é percebido como elemento chave. São apresentadas alternativas para provisão de serviços ecossistêmicos, destacando tendências como: soluções baseadas na natureza (SbN), pagamento por serviços ambientais, mercados verdes, agroturismo, redes de aproximação entre produtor-consumidor, agricultura urbana e peri-urbana, valorização multifuncional da paisagem rural e urbana, Environmental, Social & Governance (ESG), entre

outros. Apesar da popularidade que os serviços ecossistêmicos vêm ganhando, os desafios são inúmeros, entre eles a necessidade de promover avanços que possibilitem identificar, orientar e quantificar as funções da paisagem e dos serviços ecossistêmicos para melhor apoiar a tomada de decisão.

- **A saúde do solo:** a complexidade e importância do solo para a humanidade ressalta a necessidade de se tratar esse tema de forma transdisciplinar. O capítulo aborda o papel fundamental que o solo exerce no ciclo hidrológico, no contexto urbano, na medicina, nos estudos históricos e culturais; entre outros. São tópicos de destaque: a contaminação do solo e da água e seus impactos na saúde humana; a saúde do solo e o futuro da biodiversidade global; e o caráter multifuncional da ciência do solo, envolvendo produção, bem-estar humano, funções do ecossistema e transferência de energia.

Ao final do documento, o capítulo: “A Ciência do Solo e seus Desafios para o Século XXI” traz ameaças e oportunidades apresentadas na forma de futuros desafios para a pesquisa agropecuária brasileira, com destaque para a Ciência do Solo.

Esta obra atende a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estipulados pelas Nações Unidas (ONU), com os quais convergem, em até 2030, em garantir sistemas sustentáveis de produção de alimentos, assegurando uma vida saudável e que promova o bem-estar para todos, promovendo o desenvolvimento, a transferência, a disseminação e a difusão de tecnologias ambientalmente corretas, visando implementar práticas agrícolas resilientes que aumentem a produção e a produtividade; ao mesmo tempo, que ajudem a proteger, recuperar e conservar os serviços

ecossistêmicos, fortalecendo a capacidade de adaptação às mudanças do clima e às condições meteorológicas extremas, melhorando progressivamente a qualidade da terra, do solo, da água e do ar.

Referências

HAJKOWICZ, S.; COOK, H.; LITTLEBOY, A. **Our future world**: global megatrends that will change the way we live: the 2012 revision. Brisbane: CSIRO, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4225/08/584ee9706689b>.

Literatura recomendada

MARCIAL, E. C.; GRUMBACH, R. J. dos S. **Cenários prospectivos**: como construir um futuro melhor. 2. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2004.

Nota

¹ Megatendência é uma grande força composta por um conjunto de sinais e tendências que tem o poder de moldar o futuro, trazendo significativa mudanças nas condições ambientais, econômicas e sociais que ocorrerão nas próximas décadas (Hajkowicz; Littleboy, 2012).

Parte 1

A Ciência do Solo: histórico e forças motrizes

Capítulo 1. A ciência do solo no Brasil: linha do tempo

Rosângela Stralotto e Pedro Luiz de Freitas

A ciência e tecnologia tiveram um papel fundamental na transformação do cenário rural brasileiro, especialmente nos últimos 50 anos. Nos primórdios da agricultura no Brasil havia o pressuposto da pujança das nossas terras a julgar pela exuberância de sua vegetação. A histórica carta de Pero Vaz de Caminha faz referência explícita aos nossos “terrenos”, por ocasião do descobrimento, enaltecendo as boas qualidades das terras, dos ares e das águas e alusão a uma infinita fertilidade dos solos, certamente em razão do impacto visual causado pela imponente vegetação tropical (Rodrigues, 1987).

Nela, até agora, não pudemos saber que haja ouro, nem prata, nem coisa alguma de metal ou ferro; nem lho vimos. Porém a terra em si é de muito bons ares, assim frios e temperados [...]. Águas são muitas; infindas. E em tal maneira é graciosa que querendo-a aproveitar, dar-se-á nela tudo por bem das águas que tem. (Caminha, 2003, p. 14).

Em 1808, o príncipe regente do Brasil, D. João VI, percebeu que eram necessárias investigações acerca da adaptação das plantas exóticas, que então eram trazidas de diversas partes do mundo, ao clima e solo brasileiros e criou o Jardim Botânico do Rio de Janeiro (RJ) tendo esse desafio como uma de suas finalidades. Até meados da década de 1850, as pesquisas sobre a paisagem e solos brasileiros contaram com as inestimáveis contribuições de cientistas estrangeiros, que exploraram o Brasil através de expedições

científicas (Espindola, 2018). A partir de 1859, o então imperador D. Pedro II inicia uma política de criação de alguns Imperiais Institutos de Agricultura com o intuito de solucionar problemas de mão-de-obra, capital e atraso tecnológico no que se referia à produção agrícola brasileira. Nesta mesma época começam, de forma estruturada, os primeiros estudos sobre os solos brasileiros.

Em 1859 o imperador cria o Instituto Pernambucano de Agricultura, e em 1860, o Imperial Instituto Fluminense de Agricultura, localizado na área do Jardim Botânico, RJ e em 1890 é criada a Sessão Agronômica no Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Espindola (2018) relata que as investigações geológicas por pesquisadores brasileiros ganharam destaque com a Escola de Minas de Ouro Preto, criada em 1876. O autor destaca o pioneirismo da descrição da “Terra Preta de Índio” por Charles Frederic Hartt em 1885, como fruto do trabalho da Comissão Geológica do Império do Brasil.

Em 1910, é criado o Laboratório de Química Agrícola, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro, responsável, entre outras pesquisas, pela análise e estudo das terras e das rochas e dos diversos adubos e corretivos. Em 1911, o *Primeiro Congresso de Ensino Agrícola* é noticiado no jornal *O Estado de S. Paulo*. Entre as matérias apresentadas constavam nas suas grafias originais: *Noções de Agrogeologia - origem e constituição dos solos, húmus, propriedades físicas e químicas; classificação da terra arável; os solos em suas relações com o clima e a terra roxa de São Paulo*.

Em 1914 é criada a Estação Central de Química Agrícola, no Jardim Botânico do Rio de Janeiro e, em 1918, o Instituto de Química atuando em consonância com a Escola Nacional de

Agronomia, em Seropédica (RJ), no Km 47 da rodovia Rio de Janeiro-São Paulo, mais tarde renomeada Universidade Rural, Universidade Federal Rural do Brasil e Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (atual UFFRJ), baluartes no desenvolvimento da Ciência do Solo brasileira.

Na primeira metade do século passado já começava a ficar claro para os pesquisadores brasileiros a ação diferenciada dos fatores formadores do solo nas regiões tropicais e suas implicações para manejo dos solos agrícolas, para o aproveitamento dos fertilizantes, bem como os impactos dos sistemas de produção desenvolvidos para as regiões temperadas na degradação do solo nessas regiões. A agricultura brasileira era então caracterizada pela escassez de alimentos, baixa produtividade, nível mínimo de mecanização, falta de tecnologias e de informação. Como ressaltado por Schuh e Alves (1971), muito pouco se sabia sobre a resposta dos solos tropicais às aplicações de fertilizantes.

No Brasil, agricultores que migraram de países de clima temperado da Europa, Ásia e América do Norte imprimiram à agricultura brasileira as práticas e técnicas por eles conhecidas, em especial o preparo intensivo do solo. Nas condições dos solos altamente intemperizados e do clima tropical, tais práticas e técnicas causaram a rápida degradação das terras cultivadas. A utilização intensiva da mecanização, de pesticidas, corretivos e fertilizantes, somada ao monocultivo, conduziram a grande maioria das lavouras brasileiras a um processo intenso de degradação, tendo como consequência a erosão hídrica e eólica, a compactação, a arenização. Somado a outros fatores, o resultado era também de baixo rendimento por hectare, produção baseada na ocupação de

extensas áreas naturais e insuficiente para atender a demanda interna (Embrapa, 2018). Neste contexto:

O governo instituiu políticas específicas para aumentar a produção e a produtividade agrícolas, incluindo investimentos públicos em pesquisa e desenvolvimento, extensão rural e crédito farto. Era o início do intenso processo de modernização que a agricultura brasileira experimentaria nas décadas seguintes. (Embrapa, 2018).

Na década de 1960, com o aumento da área cultivada com grãos, especialmente nas regiões sudeste e sul, foram relatados vários incidentes que resultaram na erosão com formação de ravinas e voçorocas. Vários programas e políticas foram implementados para a adoção de práticas mecânicas de conservação do solo como plantio em nível, terraceamento, canais escoadouros, entre outros. Eram práticas muito bem aceitas por agricultores americanos a partir das recomendações do SCS/USDA (Soil Conservation Service/US Department of Agriculture) e que se mostraram efetivas para áreas com culturas perenes como café e citrus, e semiperenes, como a cana-de-açúcar. Surgiram os programas de atuação em microbacias hidrográficas que se espalharam em toda a região Centro-Sul a começar pelo Paraná. Ficou logo claro que a adoção de práticas mecânicas, mesmo em microbacias, não era suficiente para o controle da erosão hídrica nas áreas com culturas anuais. Terraços rompidos, formação de ravinas, assoreamento de rios e reservatórios se tornaram constantes.

Em 1972, o plantio direto é adotado pela primeira vez como prática capaz de reduzir a erosão hídrica, consolidando tentativas anteriores realizadas em universidades e institutos de pesquisa na região sul. A partir das experiências de Herbert Bartz em Rolândia, PR, com apoio do IPEAME e do GTZ, a possibilidade de produzir

sem o preparo intensivo do solo – o plantio direto na palha - passou a ser uma alternativa viável (Freitas; Landers, 2014). A observação das experiências de agricultores, com o apoio da extensão rural e assistência técnica, universidades e da iniciativa privada, por parte de pesquisa, permitiu viabilizar o plantio direto como um sistema de manejo sustentável do solo, desde que associado à práticas de diversificação de culturas por meio da rotação plurianual de culturas e da cobertura permanente do solo com culturas vivas ou seus resíduos.

O Sistema Plantio Direto (SPD) é o resultado de décadas de estudos, de observações e de experiências práticas. A aplicação de todos os conhecimentos sobre o uso e manejo sustentáveis dos recursos naturais – solo, água e biodiversidade, permite que se tenha um sistema agrícola conservacionista, reconhecido pela FAO, com o nome de Conservation Agriculture, como um sistema de manejo sustentável do solo.

O SPD agrega opções que têm sido objeto de intensos estudos e várias experiências práticas, incorporando princípios holísticos e agroecológicos à requisitos mínimos de não revolver o solo, da rotação de culturas e da manutenção da cobertura (viva ou morta) do solo, na busca de um equilíbrio ecológico. Entre essas opções temos a utilização de maneira integrada da adubação verde, de adubação orgânica, do manejo integrado de pragas e doenças, do manejo racional de plantas invasoras, de espécies arbóreas como sistemas agroflorestais, da intensificação sustentável da agricultura com a adoção de sistemas integrados (iLP, ILPF, iPF), do uso de fontes naturais de nutrientes (fosfato natural, agrominerais, etc.), da atividade biológica no manejo do solo, do uso de pesticidas, corretivos e fertilizantes de origem biológica, entre outros. A

introdução de novos produtos herbicidas, o desenvolvimento de semeadoras especializadas e eficazes na abertura de sulcos sob a palhada, na colocação precisa de adubos e sementes e no fechamento dos sulcos, o desenvolvimento de novos pulverizadores e métodos de controle de pragas e doenças, incluindo o manejo integrado e o controle biológico, o maior conhecimento do comportamento do solo – químico, físico e biológico, são alguns dos avanços que a pesquisa e as empresas proporcionaram que permitiram a adoção do SPD (Freitas, 2016).

A partir dos anos 80, SPD passou por um processo apreciável e consistente de melhoria tecnológica (Freitas, 2016). Estimativas de Polidoro et al. (2021) indicam que o SPD está presente em 2020 em mais de 33 Mha em áreas com culturas anuais e perenes e hortaliças e, em 16,2 Mha nos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF, iLP, iPF, SAFs).

De 1972 em diante seguem-se os levantamentos de solos em diversas regiões brasileiras, incluindo o Nordeste e a Amazônia e Centro-Oeste. Em 1975, a Divisão de Pedologia e Fertilidade do Solo, que havia sido criada em 1962, vinculada ao Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária (DNPEA), foi transformada em Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (SNLCS), já vinculado à Embrapa e que, em 1993, deu origem ao Centro Nacional de Pesquisa dos Solos (CNPS), a Embrapa Solos. Essa Unidade passa a integrar a estrutura da Embrapa como Centro Temático com atuação nacional, com pesquisa e desenvolvimento em pedologia, meio ambiente e uso do solo, integrando várias disciplinas. O SNLCS deu continuidade ao trabalho de reconhecimento dos solos, iniciado ainda em 1947 pela Comissão de Solos. Em 1976 foi dado início ao Programa Nipo-Brasileiro de

Cooperação para o Desenvolvimento Agrícola da Região do Cerrado (Prodecer), que levou o país à posição de segundo produtor mundial de soja. A primeira edição do Manual de Métodos de Análises de Solos foi lançada em 1979 pela Embrapa Solos e tornou-se, desde então, referência para laboratórios brasileiros.

Como resultado de anos de pesquisa e com o intuito de agilizar e aperfeiçoar o mapeamento de solos no Brasil, houve o lançamento, em 2020, com apoio do Ministério da Agricultura, da plataforma tecnológica do Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos no Brasil (PronaSolos), que reúne em sua versão 1.0 (SigWeb), mapas e dados de solos produzidos ao longo dos últimos 60 anos. Esses dados foram organizados e consolidados por meio de um sistema de informações geográficas, pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), pela Embrapa e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), órgãos estaduais e regionais e universidades.

O investimento em ciência, e em especial na ciência do solo, viabilizou importantes saltos na agricultura brasileira, mas desafios persistem. Como será o manejo dos solos brasileiros nos próximos anos? A degradação do solo persistirá impactando a mudança do clima ou políticas agrícolas contribuirão para minimizar a sua contaminação e degradação? Seremos capazes de preservar esse valioso recurso? Teremos mais consciência sobre a importância do solo na preservação da biodiversidade, serviços ecossistêmicos e equilíbrio ambiental? Avançaremos em redes de monitoramento com informações detalhadas e precisas? Não é possível responder a maioria dessas perguntas, tampouco prever qual será o cenário do futuro, mas a análise de informações presentes possibilitam

visualizar grandes tendências e seus possíveis impactos nos próximos anos.

Referências

CAMINHA, P. V. de. **Carta de Pero Vaz de Caminha a El-Rei D. Manuel sobre o achamento do Brasil**: texto integral. São Paulo: Martin Claret, 2003.

EMBRAPA. **Trajatória da agricultura brasileira**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao/trajetoria-da-agricultura-brasileira>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ESPÍNDOLA, C. R. Histórico das pesquisas sobre solos até meados do século XX, com ênfase no Brasil. **Revista do Instituto Geológico**, v. 39, n. 2, p. 27-70, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-929X.20180007>.

FREITAS, P. L. de. **Histórico do Sistema Plantio Direto (SPD)**. 2016. Disponível em: <https://agronomos.ning.com/profiles/blogs/hist-rico-do-sistema-plantio-direto-spd>. Acesso em: 17 ago. 2021.

FREITAS, P. L. de; LANDERS, J. N. The transformation of agriculture in Brazil through development and adoption of zero tillage conservation agriculture. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 2, n. 1, p. 35-46, Mar. 2014. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-6339\(15\)30012-5](https://doi.org/10.1016/S2095-6339(15)30012-5).

POLIDORO, J. C.; FREITAS, P. L. de; HERNANI, L. C.; ANJOS, L. H. C. dos; RODRIGUES, R. de A. R.; CESÁRIO, F. V.; ANDRADE, A. G. de; RIBEIRO, J. L. Potential impact of plans and policies based on the principles of conservation agriculture on the control of soil erosion in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 12, p. 3457-3468, Jul. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3876>.

RODRIGUES, C. M. Gênese e evolução da pesquisa agropecuária no Brasil: da instalação da corte portuguesa ao início da República. **Cadernos de Difusão de Tecnologia**, v. 4, n. 1, p. 21-38, jan./abr. 1987. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/145762/1/genese-e-evolucao-da-pesquisa-agropecuaria.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

SCHUH, G. E.; ALVES, E. R. de A. **O desenvolvimento da agricultura no Brasil**. Rio de Janeiro: APEC, 1971. 369 p. (APEC. Série de Agricultura, 5). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84519/1/O-desenvolvimento-da-agricultura-no-Brasil-1.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

Literatura recomendada

DICIONÁRIO histórico-biográfico das ciências da saúde no Brasil (1832-1930). Disponível em: <http://www.dichistoriasaude.coc.fiocruz.br>. Acesso em: 16 ago. 2021.

Capítulo 2. Drivers relacionados à agricultura, ambiente e sociedade com impacto para a Ciência do Solo

Silvia Kanadani Campos, Lívia Abreu Torres, Marcos Aurélio Santiago Françaço, Rachel Bardy Prado, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Édson Luis Bolfe, Thomaz Fronzaglia, Ana Paula Dias Turetta, Cynthia Cury, Otávio Valentim Balsadi e Felipe de Assis Cardoso

As mudanças demográficas, o desenvolvimento tecnológico e econômico e a interação com o meio ambiente moldarão o mundo nas próximas décadas. Individualmente ou em conjunto, essas forças estruturais - apresentarão desafios para indivíduos, comunidades e governos em escala global (National Intelligence Council, 2021). Este capítulo faz a revisão dos principais *drivers* relacionados a agricultura, meio ambiente e sociedade, com impactos na Ciência do Solo. Para facilitar a compreensão, eles foram alocados em quatro categorias, conforme detalhado na Tabela 1. Em seguida, cada um deles é explorado com mais detalhes em seções específicas.

Tabela 1. Categorias de drivers com impacto sobre a Ciência do Solo.

Categoria	Descrição	Vetores de destaque
Socioeconômico	Descreve como aspectos demográficos, de renda e de consumo afetam a demanda por alimentos e, conseqüentemente, a agricultura.	Crescimento populacional Urbanização Renda Tendências de Consumo Impactos da pandemia do Covid-19.
Agroambiental	Essa categoria reúne os drivers ambientais e agrícolas, além de abordar riscos intrinsecamente relacionados à produção agrícola e aqueles que afetam diretamente a produção agrícola.	Pressão sobre recursos naturais Impactos da mudança do clima Outros riscos
Tecnologias digitais	Refere-se à rápida evolução da transformação digital que impacta todos os elos da cadeia de valor e tem moldado as agendas de desenvolvimento rural em escala global.	Tecnologias digitais Aplicações dessas tecnologias na agricultura Conectividade
Políticas e Marcos Regulatórios	Os aspectos de regulação e governança exercem um papel fundamental sobre a ciência na medida em que estabelecem políticas e regulações com impacto sobre os setores produtivos.	PronaSolos Política Nacional de Fertilizantes Estratégia da Neutralidade da Degradação da Terra (ENDT) Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais

Drivers Socioeconômicos

A expectativa é que a população mundial atinja 8,3 bilhões no ano de 2030 (FAO, 2018) e a parcela da população urbana mundial, que atualmente é de 56%, atinja 60% (United Nations, 2018). No Brasil, a previsão é que a população atinja 224 milhões de habitantes em 2030 e 233 milhões em 2050 (IBGE, 2018), com uma taxa de urbanização de 89% em 2030 (92% em 2050), acima da média mundial (United Nations, 2018). Essa crescente urbanização

potencializará as tendências de aumento de consumo e de volume de resíduos, poluição e descargas tóxicas, demandando formas de acesso e uso mais sustentáveis dos recursos naturais (Kubik, 2012). Nos últimos 50 anos, a ação humana, motivada pela demanda por recursos naturais (alimentos, água doce, madeira, fibras e combustíveis), alteraram os ecossistemas mais do que em qualquer outro período da história (Hassan et al., 2005).

O crescimento populacional, vindo acompanhado por maior poder aquisitivo das populações de baixa e média rendas, redução da pobreza e melhorias na distribuição de renda, demandará aumento de 50% nas calorias dos alimentos globalmente até 2050. Como consequência desse aumento, a FAO projeta uma elevação de 16% nas emissões de gases de efeito estufa da agricultura (Morgan Stanley, 2020). Impulsionada por esse movimento demográfico, espera-se, por exemplo, que a demanda por alimentos aumente significativamente, em especial na África e no Sul da Ásia (FAO, 2018), impondo pressão sobre o uso da terra e dos recursos hídricos (Kubik, 2012).

As mudanças nas tendências demográficas globais reforçarão as disparidades econômicas e políticas nos próximos 20 anos. Esta pressão aumentará o potencial de atrito entre as nações (National Intelligence Council, 2021). Um contraponto a isso pode surgir com a expectativa de elevação da escolaridade das populações, a qual favorecerá participação mais ativa na tomada de decisões sobre recursos naturais e formulação de políticas (Kubik, 2012).

Em adição aos aspectos demográficos, a expectativa de renda também impacta a demanda e o consumo de alimentos. Contudo, em razão da pandemia de Covid-19, as perspectivas de crescimento

econômico estão envoltas em grande incerteza. A pandemia exacerbou crises econômicas e sociais existentes, gerou novos problemas, e evidenciou os riscos de retrocesso no combate à pobreza (Battista, 2021). A China vem apresentando recuperação mais rápida que o esperado, mas a recuperação mundial deverá ser lenta e demorada (Fundo Monetário Internacional, 2020).

A pandemia revelou, em todo o mundo, a fragilidade das cadeias agroalimentares e dos sistemas de proteção social. Ampliar a resiliência desses sistemas entrará na agenda de muitos países, tendo em vista a necessidade de melhorar a saúde populacional por meio da nutrição, da alimentação saudável e da redução dos custos com saúde e outros itens de consumo prioritários para as famílias. Uma vez que os sistemas alimentares respondem a uma ampla gama de incentivos, políticas, regulamentações e acordos comerciais, além das estratégias de atores globais, transformá-los em prol da prevenção, nutrição e sustentabilidade é uma força que se coloca com ímpeto sobre a ação pública.

Por outro lado, a pandemia intensificou movimentos que já estavam em curso, como por exemplo: aquecimento do mercado online, ênfase na rastreabilidade, preocupação com certificação de origem, com a nutrição e com a qualidade do alimento e, ainda, o crescimento da busca pela vida no meio rural. A conscientização sobre o desperdício de alimentos, bem-estar animal e respeito ao meio ambiente já eram preocupações recorrentes entre os consumidores, mas tornaram-se ainda mais destacadas. Adicione-se a isso a maior preocupação com a segurança dos alimentos, em razão da fragilidade humana frente às zoonoses.

No futuro, em que a grande maioria dos indivíduos terá acesso à internet e às mídias sociais, aumentará a consciência e a compreensão sobre os recursos naturais e as decisões que os afetam (Kubik, 2012). A democratização do acesso à internet, digitalização, busca por conveniência, preocupação com a saúde e bem-estar; maior conscientização humana e ambiental, são alguns fatores que contribuiriam para transformar percepções, hábitos e comportamentos (Neves et al., 2020). A consciência sobre a importância da alimentação saudável tem se manifestado na busca por produtos naturais, nutritivos, orgânicos, “produtos sem” (lactose, glúten e açúcar) e substitutos da carne animal.

As escolhas por cada um desses produtos geram diferentes impactos na saúde humana, no meio ambiente e nas formas de produção. As proteínas alternativas utilizam menos água e nutrientes do solo do que produtos tradicionais de origem animal, possibilitando uma economia significativa no uso líquido da terra (Wynn; Sebastian, 2019); a escolha por produtos orgânicos ajuda a preservar o solo e a sua biodiversidade (Alcântara; Madeira, 2008); a produção de alimentos biofortificados se mostra como alternativa para a desnutrição e tem relação direta com a Ciência do Solo.

Juntamente com a preocupação com os ingredientes, o interesse pela origem dos produtos tem crescido, aumentando a prevalência de sistemas de certificação e rótulos como prova de evidência e a sua rastreabilidade. As Indicações Geográficas (IG), divididas no Brasil em Indicação de Procedência e Denominação de Origem (Instituto Nacional da Propriedade Industrial, 2020), e as Marcas Coletivas¹, tem ampliado a participação de agricultores em mercados cada vez mais competitivos, conferindo registro e reconhecimento sobre a reputação, qualidade e características

agroambientais, como o clima, a vegetação e os solos do local da produção agrícola. As novas tecnologias de informação e comunicação ajudarão a disponibilizar todos os tipos de informações, desde a colheita até o ponto de venda, aproximando cada vez mais o consumidor urbano à origem dos produtos.

A tendência de valorização crescente de produtos, experiências e serviços diferenciados pode ser percebida em vários comportamentos, desde a busca por produtos com maior qualidade e sofisticação, até o desejo de personalização e diferenciação (busca pelo exclusivo, autêntico, artesanal exótico e local). Esse perfil de consumo impacta diretamente a agricultura, a ênfase no “compre local” e “direto das fazendas” tem contribuído para incrementar a venda de produtores locais, criando uma interação direta com o consumidor final, excluindo muitos intermediários dessa relação.

A busca por experiências únicas, autenticidade, valorização do patrimônio e cultura local tem impulsionado o turismo rural (agroturismo, ecoturismo e gastronômico). Visitas a vinícolas, cervejarias, rotas de café, queijos e frutas são apenas alguns exemplos que estimulam o agroturismo, a valorização dos recursos naturais e o fortalecimento dos serviços ecossistêmicos.

A maior consciência tem se mostrado como grande força capaz de provocar mudanças e comportamentos sustentáveis. A preocupação com a pegada de carbono, por exemplo, está ganhando espaço entre consumidores de todo mundo. Estudos possibilitam identificar “pegadas ambientais” de diferentes alimentos, aumentando o conhecimento sobre a quantidade de terra

e água utilizados na sua produção (Global Panel on Agriculture and Food Systems for Nutrition, 2020).

Neste contexto, as perguntas que se colocam: como lidaremos com a crescente demanda por recursos naturais? Será que as restrições sobre o uso do solo e da água culminarão em disputas entre nações, ou serão bem administradas, suscitando inovações tecnológicas, sociais e gerenciais, bem como políticas públicas mais assertivas e comportamentos mais conscientes, abrindo via para um futuro melhor?

Drivers Agroambientais

A preocupação com o crescimento da demanda versus a restrição de recursos naturais, tem pressionado a sociedade pelo melhor uso da terra, da água, pela redução de emissões de gases de efeito estufa (GEE), pela maior eficiência na produção agrícola, e adoção de medidas para restauração dos solos (FAO, 2018).

Esses desafios destacam o papel primordial dos solos e a sua capacidade produtiva. A importância desses drivers se deve aos impactos sobre a produção de alimentos, as mudanças nos padrões de consumo e as pressões sobre os recursos naturais, conformando desafios que ameaçam a segurança alimentar e hídrica.

A expansão da demanda e do consumo de alimentos deverá colocar ainda mais pressão sobre os preços e aumentar a preocupação com o cumprimento dos objetivos de segurança alimentar e nutricional e combate à fome. Também há preocupação de que mudanças na posição relativa do PIB das nações, e interesses econômicos globalizados em relação ao meio ambiente,

provocarão alterações imprevistas nas prioridades de financiamento. A crescente globalização exigirá dos países, instituições, empresas e indivíduos uma visão mais ampla e internacional dos recursos naturais, demandando a elaboração de uma agenda global (Kubik, 2012).

Adicionalmente, o setor do agro será impactado pela mudança do clima. Os impactos ambientais e sociais serão diversos, afetando a maioria dos interesses vitais da sociedade (Mimura et al., 2014). Os eventos climáticos extremos (chuvas fortes, secas e clima severo) estão ocorrendo com mais intensidade e frequência nos últimos anos, segundo o Painel Brasileiro de mudanças do clima (Ribeiro; Santos, 2016) e aumentam o potencial de erosão dos solos e as inundações, exigindo que práticas conservacionistas sejam ajustadas para a variabilidade e intensidade desses eventos.

As possíveis mudanças de precipitação podem alterar os recursos hídricos e limitar a produtividade, exigindo adaptação dos sistemas de irrigação. Regiões com histórico de precipitação suficiente podem sofrer secas frequentes, demandando sistemas de armazenamento de água para complementar a água para irrigação, ou infraestrutura para bombear água de recursos subterrâneos que não são usados atualmente (Delgado et al., 2020).

As áreas secas do planeta sofrerão ainda mais com a falta de água, como é o caso do Semiárido brasileiro, sendo assim, a água potável, que já é escassa em algumas regiões, poderá ser foco de disputas políticas e muitos conflitos humanos. Além disso, com o aumento da escassez hídrica, a ocorrência de incêndios florestais poderá ser mais frequente, ocasionando perda de biodiversidade e ameaçando a vida da população, como já vem ocorrendo no Brasil.

É preciso considerar ainda os impactos que as mudanças do clima causarão nas perdas de nutrientes, perdas por erosão, transporte superficial de nutrientes e agroquímicos, desnitrificação e perdas atmosféricas de N (Delgado et al., 2020). A redução de habitats e a extinção de espécies ameaçam as cadeias de produção de alimentos e os serviços ecossistêmicos a elas associados, assim como a saúde humana (World Economic Forum, 2020).

Se enchentes aumentarem, será necessário considerar sistemas de drenagem alterados ou sistemas de plantio diferentes, como canteiros elevados. Todos esses riscos demonstram a importância de conectar as análises de clima e erosão a modelos que possam avaliar os impactos na saúde do solo e nas emissões de gases de efeito estufa (Delgado et al., 2020). Tanto os sistemas produtivos quanto os de abastecimento devem, portanto, buscar formas de se adaptar às novas condições conforme as suas particularidades. O planejamento, monitoramento e governança do solo e da água, por diversos setores da sociedade, são elementos transformadores nesse processo de adaptação.

Como a agropecuária é extremamente vulnerável às mudanças do clima, poderá sofrer impactos também como as perdas significativas nas safras de grãos e alterações da geografia da produção agropecuária brasileira (Marengo, 2006).

O setor agrícola, como uma atividade econômica, também tem um efeito ativo sobre as mudanças do clima, relacionado às emissões de gases de efeito estufa oriunda dos sistemas de produção. Isto ressalta a importância de adotar práticas de manejo sustentável do solo e da água na agropecuária como estratégia de adaptação,

umentando assim a resiliência e reduzindo os impactos nos aspectos socioeconômicos e ambientais no meio rural (FAO, 2015).

Em razão da amplitude e gravidade deste driver, será necessária uma coordenação multilateral e multissetorial imediata para lidar com as mudanças do clima, sobretudo diante do cenário global incerto. A dificuldade de normatizar o mercado global de carbono na COP25 alerta para fragilidade em se ter um sistema confiável de pagamento entre países para projetos de redução das emissões (World Economic Forum, 2020). Para que se alcance mudança significativa, será necessário compromisso dos principais emissores.

O enfrentamento das mudanças do clima e seus impactos na saúde do solo e qualidade da água requer soluções imediatas que atendam às necessidades atuais, ao mesmo tempo que contemplem as gerações futuras. Neste contexto, inúmeros são os desafios a serem enfrentados: i) futuras reduções previstas no conteúdo de matéria orgânica do solo; ii) potenciais impactos negativos da intensificação da agricultura na saúde do solo; iii) gerenciamento da variabilidade espacial e temporal para aumentar a eficácia da conservação em toda a paisagem; e iv) a proteção da qualidade da água e perdas de nutrientes dos campos agrícolas (Delgado; Sassenrath, 2020). Os investimentos para o desenvolvimento de tecnologias para sistemas de produção mais resilientes às mudanças do clima também serão cada vez mais necessários (World Economic Forum, 2020).

Por ser dependente dos processos biológicos e dos recursos naturais como clima e solo, e em razão da maior rigidez no processo produtivo - e menor flexibilidade para ajustes às condições naturais ou de mercado -, outros riscos são adicionados ao processo

produtivo e podem assim ser divididos: a) os intrinsecamente relacionados à produção agrícola e; b) os riscos que afetam a produção agrícola.

No processo produtivo, fazem parte do dia-a-dia do produtor os riscos biológicos relacionados a pragas e doenças, que vem sendo agravados pela contínua perda de diversidade nas diferentes espécies. A crescente especialização, a necessidade de investimentos cada vez maiores, e o atrelamento aos mercados financeiros embutem outros riscos a este processo.

Os riscos relacionados ao agro podem assim ser resumidos (Embrapa, 2018): a) Riscos de produção; b) Riscos sanitários; c) Riscos de gestão dos recursos (em especial dos recursos naturais); d) Riscos de crédito e comercialização; e) Riscos relacionados ao mercado externo; f) Riscos decorrentes da infraestrutura e g) Riscos do ambiente institucional relacionados a direitos de propriedade mal definidos, mudanças nas regras de comércio e mudanças nas regras relacionadas à própria produção.

Outro importante fator de risco é a dependência de importação de insumos, especialmente de fertilizantes, que vem aumentando ano após ano, e atualmente mais de 84% do consumo total de fertilizantes na agricultura brasileira foi suprido por importações (Teixeira, 2021), sendo que em 2015 esse percentual era de 70% (Cruz et al., 2017). Para agravar essa situação, os fertilizantes respondem por mais de 40% do custo total de produção das principais culturas no Brasil e seus preços sofrem grande influência dos preços da matéria-prima internacional, das commodities agrícolas e do petróleo (Embrapa, 2018). Adicionalmente, no

mercado interno, a falta de regulação faz surgirem produtos sem eficiência comprovada por fontes idôneas.

Em termos globais, a "perda de biodiversidade" é apontada como o segundo risco com maior impacto e o terceiro risco mais provável para a próxima década segundo o "Levantamento Global de Percepção de Risco" (World Economic Forum, 2020). Por um lado, a produção de alimentos depende da biodiversidade, e por outro, a depender do modo ou sistema de produção, tem impacto negativo sobre a mesma. A redução da biodiversidade contribui ainda para o agravamento da mudança do clima. A biodiversidade terrestre e marinha juntas reduzem as emissões de GEE e são responsáveis pelo sequestro de 5,6 gigatoneladas de carbono por ano, o que equivale a 60% das emissões globais causadas pelo homem (World Economic Forum, 2020).

Avanços das tecnologias digitais

Em paralelo, muitos dos movimentos recentes refletem os avanços das tecnologias de informação e de comunicação, que ocorrem a uma velocidade exponencial. No agro, essa transformação consolida a chamada Agricultura Digital que traz inúmeros avanços tecnológicos: internet das coisas- IoT Agrícola (Verdouw et al., 2019), big data (Wolfert et al., 2017), inteligência artificial (Abraham et al., 2020), Sensoriamento Remoto (Kayad et al., 2020); Inteligência Artificial; Aplicativos Móveis (Michels et al., 2020), Plataformas Digitais (PronaSolos..., 2020), blockchain, dentre outros. Esses ativos transformam o campo por meio de sensores, aplicativos, softwares e a integração e interpretação de dados e informações sobre o solo, tornando o processo da produção mais competitivo e rentável.

A transformação digital tem ainda moldado agendas de desenvolvimento rural em escala global, exercendo papel cada vez mais relevante no avanço dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS - 2030) (United Nations Global Compact, 2017), especialmente em suas aplicações no apoio a tomada de decisão na agricultura, complementando o conhecimento local com dados detalhados e em tempo real sobre os recursos naturais e mercados.

São inúmeros os desafios para amplificar a digitalização do campo no Brasil, entre eles: serviços digitais online; gestão e monitoramento da produção vegetal e animal; base de dados em agricultura; conectividade no campo; custos de tecnologias digitais; sucessão familiar rural e desenvolvimento rural sustentável.

Por outro lado, há uma série de tendências que se descortinam em oportunidades tais como: tecnologias digitais disruptivas; capacitações em agricultura digital; mercado consumidor na era digital; plataformas digitais, sistema de projeção de riscos futuros; rastreabilidade e certificações; e sociedade 5.0. Conforme pode-se perceber, as tecnologias digitais têm elevado potencial para amparar futuras ações de PD&I em mapeamentos multiescalares, análises integradas e gestão de bases de dados dos solos tropicais, favorecendo a melhor tomada de decisão na produção de alimentos, fibras e energia (Bolfe et al., 2020).

Sobre aplicações futuras das tecnologias digitais, foi observado que os agricultores brasileiros têm principalmente o interesse em iniciar ou fortalecer o uso de sistemas e aplicativos em atividades envolvendo a detecção e controle de deficiências nutricionais, déficit hídrico, mapeamento de uso da terra, estimativas de produção e produtividade agrícola (Bolfe et al., 2020).

No entanto, salienta-se que, de acordo com o Censo Agropecuário, em 2017, mais de 70% dos estabelecimentos agropecuários não tinham acesso à Internet (IBGE, 2017). Em algumas regiões, como Norte e Nordeste, cerca de 85% e 80%, respectivamente, não tinham acesso este serviço por falta de conectividade.

O estudo *Cenários e perspectivas da conectividade para o Agro*, conduzido por pesquisadores da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq/USP), demonstra que, caso sejam aproveitadas para o sinal 4G, as 4.400 torres e antenas já existentes no país, a cobertura atual de 23% subiria para 48% nas áreas rurais até 2026, o que poderia promover um crescimento de 4,5% no Valor Bruto de Produção (VBP) (Brasil, 2021b). Segundo as conclusões deste estudo, o impacto decorre do efeito do acesso à internet sobre a adoção de tecnologias mais produtivas nos estabelecimentos rurais, ou seja, a possibilidade de acessar informação permite que os produtores descubram e utilizem tecnologias mais adequadas à sua realidade.

Sem uma ampla acessibilidade a estes serviços pela maioria dos produtores rurais, será muito difícil romper com o atual padrão da concentração da produção agropecuária em uma reduzida parcela dos estabelecimentos agropecuários.

Políticas e marcos regulatórios

É importante mencionar que políticas e marcos regulatórios estão diretamente relacionados ao desenvolvimento científico e tecnológico. As Instituições de Ciência e Tecnologia estão cada vez mais conscientes de que não são apenas provedoras de produtos,

serviços e processos, mas são também geradoras de conhecimento e informações usadas na construção e melhoria de Políticas Públicas e Marcos Regulatórios. Cabe à ciência aproximar-se do ambiente político-institucional e apresentar suas contribuições. Governos federal, estaduais e municipais buscam, cada vez mais, se apoiar em bases de conhecimento científico para a tomada de decisões na gestão pública.

Por outro lado, o desenvolvimento científico e tecnológico sofre influência dos mais diversos marcos regulatórios. A consolidação da agenda internacional relacionada à sustentabilidade, amplamente vinculada à Agenda 2030, à Convenção sobre Diversidade Biológica (CDB), à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre mudanças do clima (UNFCCC) e Convenção Internacional de Proteção de Plantas (IPPC), impacta diretamente os Estados, pois traz novos compromissos para os agentes reguladores considerar ao elaborarem as regras nacionais ou regionais.

Marcos já consolidados como o Plano Agrícola e Pecuário, Política Nacional de Biodiversidade e o Plano Nacional sobre Mudança do Clima, entre outros, vão continuar a influenciar decisivamente a trajetória do agro nacional. Entretanto, novos marcos vão surgir ou se consolidar, à medida em que a sociedade demanda do setor agropecuário sua adequação aos novos elementos ambientais e socioeconômicos com os quais ela se depara.

No Brasil, exemplos de marcos regulatórios em ascensão são o Programa Nacional de Solos do Brasil (PronaSolos); a Estratégia da Neutralidade da Degradação da Terra (ENDT) e o Plano Nacional de Fertilizantes. O primeiro está se consolidando como uma ação

governamental de longo prazo, que lançará mão de um abrangente trabalho de pesquisa e desenvolvimento para ampliar o potencial e a conservação dos solos no Brasil. A ENDT, à qual o Brasil aderiu em 2017 no âmbito dos esforços internacionais de combate à desertificação e à vulnerabilidade do solo, está amplamente relacionada à Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas, com a ambiciosa missão de alcançar um mundo neutro em termos de degradação do solo. O Plano Nacional de Fertilizantes tem por objetivo fortalecer políticas de incremento da competitividade da produção e da distribuição de insumos e de tecnologias para fertilizantes no País de forma sustentável, abrangidos adubos, corretivos, condicionadores e novas tecnologias, para diminuir a dependência externa e a ampliar a competitividade do agronegócio brasileiro no mercado internacional. Outros exemplos de marcos legais são a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta- iLPF (Lei 12.805/2013) (Brasil, 2013); a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais- PSA (Lei 14.119/2021) (Brasil, 2021a); a Conferência do Clima em Madrid (COP 25); o Plano Safra, entre outros.

Essa sintonia com os novos desafios que se delineiam para o agro é importante para transformá-los em balizas orientadoras que direcionam as escolhas políticas, tais como (FAO, 2018): i. Crescimento populacional e econômico como drivers no futuro da demanda agrícola; ii. Segurança alimentar e nutricional em um contexto de desigualdade crescente e transformações nos sistemas agroalimentares; iii. Limitação de recursos naturais e investimentos insuficientes; iv. Impactos das mudanças do clima na área agrícola e alimentar.

Apesar dos drivers apresentados se configurarem como forças consolidadas com grande probabilidade de ocorrer nos próximos anos, há inúmeras incertezas relacionadas a uma ampla gama de fatores como mudanças tecnológicas, disponibilidade dos recursos naturais, fatores de produção, dinâmica populacional, mudanças do clima, investimentos públicos, privados e políticas destinadas a fortalecer instituições, dentre outros (FAO, 2018).

Ao longo dos próximos capítulos, o presente documento aprofunda a discussão sobre tendências e sinais nas megatendências: “convergência de tecnologias digitais e da informação”; “bioeconomia e biotecnologia na ciência do solo”; “intensificação da agricultura com sustentabilidade”; “crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais”; “serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis”; e “a saúde do solo”, apresentando desafios e, sobretudo, reflexões sobre o futuro da ciência do solo.

Referências

ABRAHAM, E. R.; REIS, J. G. M. dos; VENDRAMETTO, O.; COSTA NETO, P. L. de O.; TOLOI, R. C.; SOUZA, A. E. de; MORAIS, M. de O. Time series prediction with artificial neural networks: an analysis using Brazilian soybean production. **Agriculture**, v. 10, n. 10, 475, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10100475>.

ALCÂNTARA, F. A. de; MADEIRA, N. R. **Manejo do solo no sistema de produção orgânico de hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2008. 10 p. (Embrapa Hortaliças. Circular técnica, 64). Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPH-2009/34840/1/ct_64.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

BATTISTA, A. di. Para além do digital, o Brasil deveria focar na construção de mercados do amanhã. In: OLIVEIRA, C. A. A. de; MENEZES, H. R. G. de (ed.). **Digital: a economia que move as empresas e o mundo: onde estamos e aonde podemos chegar**. Nova Lima: Fundação Dom Cabral, 2021. cap. 10, p. 83-91. DOI: <https://doi.org/10.52959/2021135286>.

BOLFE, E. L.; BARBEDO, J. G. A.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; SOUZA, K. X. S. de; ASSAD, E. D. Desafios, tendências e oportunidades em agricultura digital no Brasil. In: MASSRUHÁ, S. M. F. S.; LEITE, M. A. de A.; OLIVEIRA, S. R. de M.; MEIRA, C. A. A.; LUCHIARI JUNIOR, A.; BOLFE, E. L. (ed.). **Agricultura digital**: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas. Brasília, DF: Embrapa, 2020. cap. 16, p. 380-406. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/217713/1/LV-Agricultura-digital-2020-cap16.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.805, de 29 de abril de 2013**. Institui a Política Nacional de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta e altera a Lei nº 8.171, de 17 de janeiro de 1991. Brasília, DF, 2013. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2013/lei/l12805.htm. Acesso em: 20 jul. 2021.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Brasília, DF, 2021a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14119.htm. Acesso em: 22 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cenários e perspectivas da conectividade para o agro**. Brasília, DF: Mapa/AECS, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/conectividade-rural/livro>. Acesso em: 12 nov. 2021.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. dos S.; FIGUEIREDO, V. S. de. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, n. 45, p. 137-187, 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11814/1/BS%2045%20Fertilizantes%20organominerais%20de%20res%20c3%20adduos%20%5b...%5d_P_BD.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

DATASEBRAE. **Marcas coletivas**. 2018. Disponível em: <https://datasebrae.com.br/marcas-coletivas/#oqueeh>. Acesso em: 22 jan. 2022.

DELGADO, J. A.; GANTZER, C. J.; SASSENATH, G. F. The future of soil, water, and air conservation. In: DELGADO, J. A.; GANTZER, C. J.; SASSENATH, G. F. (ed.). **Soil and water conservation**: a celebration of 75 years. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2020. cap. 29, p. 307-331. Disponível em: https://www.swcs.org/static/media/cms/75th_Book_online_large_0D2D426346A86.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

DELGADO, J. A.; SASSENATH, G. F. From the dust bowl to precision conservation. In: DELGADO, J. A.; GANTZER, C. J.; SASSENATH, G. F. (ed.). **Soil and water conservation**: a celebration of 75 years. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2020. cap. 25, p. 270-285. Disponível em: https://www.swcs.org/static/media/cms/75th_Book_online_large_0D2D426346A86.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

EMBRAPA. **Visão 2030**: o futuro da agricultura brasileira. Brasília, DF, 2018. 212 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194611/1/Visao-2030-o-futuro-da-agricultura-brasileira.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

FAO. **Manual de agricultura climaticamente inteligente**: resumen de orientación. Rome, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/climatechange/37495-0edc2355c27f19ee5cee068a90496add9.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

FAO. **The future of food and agriculture**: alternative pathways to 2050. Rome, 2018. 202 p. Disponível em: <http://www.fao.org/3/I8429EN/i8429en.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

FUNDO MONETÁRIO INTERNACIONAL. **World economic outlook**: a long and difficult ascent. Washington, DC, 2020. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2020/09/30/world-economic-outlook-october-2020#Full%20Report%20and%20Executive%20Summary>. Acesso em: 12 maio 2021.

GLOBAL PANEL ON AGRICULTURE AND FOOD SYSTEMS FOR NUTRITION. **Future food systems**: for people, our planet, and prosperity. London, 2020. Disponível em: https://www.glopan.org/wp-content/uploads/2020/09/Foresight-2.0_Future-Food-Systems_For-people-our-planet-and-prosperity.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

HASSAN, R.; SCHOLLES, R.; ASH, N. (ed.). **Ecosystems and human well-being**: current state and trends: findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: Island Press, 2005. (The millennium ecosystem assessment series, v. 1). Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.766.aspx.pdf>. Acesso em: 11 maio 2021.

IBGE. **Censo agropecuário 2017**. Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/21814-2017-censo-agropecuario.html?=&t=o-que-e>. Acesso em: 20 abr. 2021.

IBGE. **Projeções da população**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9109-projecao-da-populacao.html?edicao=21830&t=o-que-e>. Acesso em: 20 abr. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL (Brasil). **Indicações Geográficas**. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/inpi/pt-br/servicos/perguntas-frequentes/indicacoes-geograficas>. Acesso em: 26 jul. 2021.

KAYAD, A.; PARAFOROS, D. S.; MARINELLO, F.; FOUNTAS, S. Latest advances in sensor applications in agriculture. **Agriculture**, v. 10, n. 8, 362, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture10080362>.

KUBIK, G. H. Global mega forces: implications for the future of natural resources. In: BENGSTON, D. N. (comp.). **Environmental futures research**: experiences, approaches, and opportunities. Newtown Square: USDA, Forest Service, Northern Research Station,

2012. p. 25-36. Disponível em: <https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr-p-107papers/05kubik-p-107.pdf>. Acesso em: 26 jan. 2022.

MARENGO, J. A. **Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre a biodiversidade**: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília, DF: MMA, 2006. (Série Biodiversidade, v. 26). Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/04/mc_globais_efeitos_biodiversidade.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

MIMURA, N.; PULWARTY, R. S.; DUC, D. M.; ELSHINNAWY, I.; REDSTEER, M. H.; HUANG, H. Q.; NKEM, J. N.; SANCHEZ RODRIGUEZ, R. A. Adaptation planning and implementation. In: FIELD, C. B.; BARROS, V. R.; DOKKEN, D. J.; MACH, K. J.; MASTRANDREA, M. D.; BILIR, T. E.; CHATTERJEE, M.; EBI, K. L.; ESTRADA, Y. O.; GENOVA, R. C.; GIRMA, B.; KISSEL, E. S.; LEVY, A. N.; MACCRACKEN, S.; MASTRANDREA, P. R.; WHITE, L. L. (ed.). **Climate change 2014**: impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014. cap. 15, p. 869-898. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-PartA_FINAL.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

MORGAN STANLEY. **The future of food**: complexities and compromises. New York, 2020. Report 6 Dec. 2020

NATIONAL INTELLIGENCE COUNCIL (Estados Unidos). **Global trends 2040**: a more contested world. 2021. Disponível em: https://www.dni.gov/files/images/globalTrends/GT2040/GlobalTrends_2040_for_web1.pdf. Acesso em: 26 jan. 2022.

NEVES, M. F.; GRAY, A.; VALERIO, F. R.; MARTINEZ, L. F.; RODRIGUES, J. M.; KALAKI, R. B.; MARQUES, V. N.; CAMBAUVA, V. **Food and agribusiness in 2030**: a roadmap. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3920/978-90-8686-907-7>.

PRONASOLOS: Programa Nacional de Solos do Brasil: Geoportal. 2020. Disponível em: <https://geoportal.cprm.gov.br/pronasolos/>. Acesso em: 9 dez. 2020.

RIBEIRO, S. K.; SANTOS, A. S. (ed.). **Mudanças climáticas e cidades**: relatório especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016. 116 p. Disponível em: http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/documentos/Relatorio_UM_v10-2017-1.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

TEIXEIRA, M. J. Análise do mercado de fertilizantes no Brasil no período de 2016 a 2020. In: CONGRESSO DE LOGÍSTICA DAS FATECS, 12., Mogi das Cruzes, 2021. **Gestão da cadeia de suprimentos no agronegócio**: desafios e oportunidades no contexto atual: anais. Mogi das Cruzes: FATEC, 2021. XII FATECLOG. Disponível em: <https://fateclog.com.br/anais/2021/93-84-1-RV.pdf>. Acesso em 12 nov. 2021.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. Urban and rural populations. In: UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World urbanization prospects: the 2018 revision**. New York, 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Download/>. Acesso em: 11 maio 2021.

UNITED NATIONS GLOBAL COMPACT. **Digital agriculture**. 2017. Disponível em: <http://breakthrough.unglobalcompact.org/disruptive-technologies/digital-agriculture>. Acesso em: 9 dez. 2020.

VERDOUW, C.; SUNDMAEKER, H.; TEKINERDOGAN, B.; CONZON, D.; MONTANARO, T. Architecture framework of IoT-based food and farm systems: a multiple case study. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 165, 104939, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104939>.

WOLFERT, S.; GE, L.; VERDOUW, C.; BOGAARDT, M.-J. Big data in smart farming: a review. **Agricultural Systems**, v. 153, p. 69-80, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.023>.

WORLD ECONOMIC FORUM. **The global risks report 2020**. Geneva, 2020. Disponível em: http://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risk_Report_2020.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

WYNN, K.; SEBASTIAN, B. **Growth opportunities for Australian food and agribusiness: economic analysis and market sizing**. Canberra: CSIRO, 2019. (CSIRO Futures). Disponível em: <https://www.csiro.au/~media/Do-Business/Files/Futures/GrowthOpportunitiesAustralianFoodAgribusiness.pdf?la=en&hash=BAC572AD72A067B38582174837B535AAB206399A>. Acesso em: 26 jan. 2022.

Literatura recomendada

FAO. **The state of food security and nutrition in the world 2021: transforming food systems for food security, improved nutrition and affordable healthy diets for all**. Rome, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb4474en>.

KOPITTKKE, P. M.; MENZIES, N. W.; WANG, P.; MCKENNA, B. A.; LOMBI, E. Soil and the intensification of agriculture for global food security. **Environmental International**, v. 132, 105078, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105078>.

MARENGO, J. A. Impactos das condições climáticas e da variabilidade e mudanças do clima sobre a produção e os preços agrícolas: ondas de frio e seu impacto sobre a cafeicultura nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. In: LIMA, M. A. de; CABRAL, O. M. R.; GONZALEZ MIGUEZ, J. D. (ed.). **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 97-123. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/180697/1/Lima-mudancas-4702-Lv.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

MONTEIRO, J. M. G.; ANGELOTTI, F.; SANTOS, M. M. de O. Adaptação e mitigação às mudanças climáticas: contribuição dos serviços ecossistêmicos dos solos. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 32-36, maio/ago. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167333/1/2017-041.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

MONTEIRO, J. M. G. **Plantio de oleaginosas por agricultores familiares do semi-árido nordestino para produção de biodiesel como uma estratégia de mitigação e adaptação às mudanças climáticas**. 2007. 315 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. Disponível em: http://www.ppe.ufrj.br/images/publica%C3%A7%C3%B5es/doutorado/Joyce_Maria_Guimar%C3%A3es_Monteiro.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

OLSON, R. Environmental futures research at the U.S. Environmental Protection. In: BENGSTON, D. N. (comp.). **Environmental futures research: experiences, approaches, and opportunities**. Newtown Square: USDA, Forest Service, Northern Research Station, 2012. p. 66-77. Disponível em: <https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr-p-107papers/09olson-p-107.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

STEINER, J. L.; FORTUNA, A. M. Climate change, greenhouse gas emissions, and carbon sequestration: challenges and solutions for natural resources conservation through time. In: DELGADO, J. A.; GANTZER, C. J.; SASSENATH, G. F. (ed.). **Soil and water conservation: a celebration of 75 years**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2020. cap. 22, p. 229-240. Disponível em: https://www.swcs.org/static/media/cms/75th_Book_online_large_0D2D426346A86.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

WESTBROOK, G.; ANGUS, A. **10 principais tendências de consumo globais 2021**. [S.l.]: Euromonitor International, 2021. Disponível em: https://www.moveisdevalor.com.br/portal/upload/files/arquivos/euromonitor_tendencias_globais_de_consumo.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

Nota

¹ A marca coletiva identifica produtos ou serviços originários de membros de determinada entidade coletiva como por exemplo: associação, cooperativa, sindicato, consórcio, federação, confederação, entre outros (DataSebrae, 2018).

Parte 2

Megatendências para a Ciência do Solo

Capítulo 3. Convergência das tecnologias digitais e da informação

Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz, Margareth Gonçalves Simões, Gustavo de Mattos Vasques, Mauricio Rizzato Coelho, José Francisco Lumbreras e Ricardo de Oliveira Dart

Os desafios do futuro exigirão abordagens diferentes para a solução dos problemas da agricultura, indo além dos limites das disciplinas tradicionais. A convergência e integração de conhecimentos, informações e tecnologias será indispensável para promover avanços científicos, sociais, ambientais e econômicos, configurando-se como uma importante tendência na agropecuária.

Conceitualmente, a Convergência Tecnológica (CT) consiste no processo de integração sinérgica entre múltiplas áreas do conhecimento científico e tecnológico, que tem permitido acelerar a geração de novos conhecimentos, soluções tecnológicas e na produção de bens e serviços, fazendo com que avanços em uma área permitam o progresso em outras (Spohrer; Engelbart, 2004).

A CT é definida como:

[...] uma abordagem para a resolução de problemas que ultrapassa as fronteiras disciplinares e integra conhecimentos, ferramentas e formas de pensar das ciências da vida e da saúde, ciências físicas, matemáticas e computacionais, disciplinas de engenharia, além de formar um abrangente quadro sintético para enfrentar os desafios que se põe nos mais variados campos. (National Research Council, 2014, tradução nossa).

Com efeito, a convergência tecnológica abrange diversos e distintos domínios de conhecimento e campos de atuação, e serão tratadas as tendências e inovações relacionadas à integração convergente de tecnologias que têm alicerçado a Agricultura Digital (AD). Especificamente será dada ênfase no domínio de conhecimento da ciência dos solos e suas aplicações, as tendências de evolução tecnológica baseadas na convergência entre os seguintes domínios: Rede de Sensores sem fio, Internet e Inteligência Artificial, e, Geotecnologias, Inteligência Artificial e a Computação de Alto Desempenho.

Rede de Sensores sem fio, Internet e Inteligência Artificial.

As tecnologias como as redes de sensores sem fio (Wireless Sensor Networks) e a internet das coisas (Internet of Things – IoT), conectando diversos equipamentos e dispositivos à Internet, prometem revolucionar a Agricultura Digital (AD). As redes de sensores sem fio integradas à internet possibilitarão a prestação de inúmeros serviços de coleta e interpretação de dados que se converterão em informações de valor gerencial em suporte a tomada de decisão de diversas tarefas relacionadas às cadeias produtivas do setor Agro.

Sensores, cada vez mais precisos e diversificados permitirão a medição de uma ampla gama de dados agronômicos e ambientais. Assim, sensores inteligentes instalados nos campos agrícolas, nos solos, nos animais, nos veículos, maquinário e equipamentos, nas edificações (estábulo, celeiros e silos), em drones e em smartphones, permitirão a coleta massiva de dados que serão transferidos sem fio para sistemas de armazenamento e

processamento em nuvem, e, por meio de algoritmos de inteligência artificial (*machine and deep learning*) grandes bases de dados são analisadas (*big data analytics*), gerando informações úteis para a tomada de decisão em diversas etapas da cadeia de valor da produção agropecuária.

No âmbito da ciência dos solos, manejo e irrigação, diversos exemplos têm sido observados, como os *IoT smart irrigation management systems*, nos quais parâmetros como umidade do solo, temperatura do solo e do ar são detectados e, juntamente com dados de previsão meteorológica, permitem o gerenciamento automático da aplicação das lâminas de irrigação, aumentando a eficiência do uso da água e otimizando a utilização dos recursos hídricos (Roopaei et al., 2017; Goap et al., 2018).

Diversos sensores de contato ou proximais para medir propriedades físicas e químicas dos solos, baseados em princípios diversos, têm sido desenvolvidos e testados com vistas a aquisição sistemática de dados com maior densidade amostral de forma mais rápida e menos laboriosa. Sensores elétricos/eletromagnéticos medem a resistividade elétrica (RE) ou sua condutividade elétrica aparente (CEa) que se relacionam a vários atributos constituintes dos solos como a textura, a salinidade, conteúdo de sódio, umidade, capacidade de troca catiônica, nitrato residual, dentre outros (Corwin; Lesch, 2005). Os sensores eletroquímicos utilizam membranas ion-seletivas que produzem tensão em resposta à atividade de íons específicos tornando possível medir o pH e estimar o conteúdo de outros atributos relacionados à natureza química dos solos, como: H⁺, K⁺, NO₃⁻, Na⁺, etc. (Adamchuk et al., 2004). Merece destaque também o desenvolvimento de sensores proximais baseados em espectroscopia vis-NIR que se caracterizam

como uma técnica multi-informacional, rápida e de baixo custo operacional, com bons desempenhos para predição de atributos físicos (Eitelwein, 2017) e atributos químicos, tais como CTC, teores de K e P disponíveis (Demattê et al., 2015).

Cabe menção também a desenvolvimentos recentes de instrumentos de campo baseados em sensores de análise elementar como os de Fluorescência de Raio-X (XRF) e LIBS (Gałuszka et al., 2015). Os diferentes sensores permitem a obtenção de diversos dados sobre os solos, possibilitando caracterizar a variabilidade espacial das propriedades pedológicas em escala detalhada, permitindo o mapeamento digital de atributos de solos (*Digital soil mapping*).

Os dados se aplicam a diversas soluções relacionadas à edafologia e à pedometria e ao mapeamento digital de atributos de solos (*Digital soil mapping*), visando a otimização de processos e o aumento da produtividade dos sistemas produtivos (Sudduth et al., 1997; Adamchuk et al., 2004).

Conclui-se, portanto, que a integração convergente de três domínios técnico-científicos distintos – *sensor engineering*; *wireless networks/internet*; *artificial intelligence* – estão pavimentando esta evolução tecnológica que está se constituindo em uma forte tendência com diversas aplicações na agricultura digital.

Os analistas ainda apontam que o acesso a esse rol de tecnologias está cada vez mais facilitado devido à considerável redução dos custos e aos notáveis avanços na performance dos sensores (Barcelo-Ordinas et al., 2013; Buckmaster, 2016; Clifford, 2016; Sharma et al., 2016; Small, 2017).

Investimento em mapeamento de Solo

Atualmente, o Brasil tem seus solos mapeados integralmente na escala 1:250.000. Em escalas mais detalhadas, apenas 7,54 % do seu território está coberto por mapas de solos publicados na escala 1:100.000 e apenas 1,76% em escalas mais detalhadas que essa.

A demanda atual no país, no entanto, é para levantamentos de solo em escalas iguais ou mais detalhadas que 1:100.000 a fim de prover dados e informações - imprescindíveis - para as adequadas tomadas de decisão em níveis estadual (zoneamentos agroecológicos, econômico-ecológicos), municipal (planejamento de uso da terra – rural e urbano) e de microbacia hidrográfica (planejamento de uso, manejo e conservação do solo) (Polidoro et al., 2021) com vistas ao desenvolvimento sustentável calcado em sólidas bases técnico-científicas. Tais bases, providas pelos dados e informações advindos dos levantamentos de solos, desde que produzidos em escalas compatíveis às suas demandas, devem ser ecléticas no sentido de atenderem multiusuários, estarem acessíveis gratuita e amigavelmente em uma única plataforma tecnológica desenvolvida para este fim com características funcionais que atendam, com dinamicidade, eficiência e eficácia, as mais variadas necessidades de multiusuários de forma a ser plenamente apropriada pela sociedade, em benefício próprio. Essas são as premissas do Programa Nacional de

Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil. De acrônimo PronaSolos, o programa do governo federal, de execução orçamentária pública e privada, visa criar as condições para a reativação dos levantamentos sistemáticos de solo e interpretações de uso em escala nacional. Seu elevado custo de implantação e execução, estimado em 130 milhões/ano por um período de trinta anos (Polidoro et al., 2021) - valor expressivo para qualquer projeção de conjuntura econômica especulativa que se faça para o Brasil em igual período – deve ser analisado sob a ótica de investimento em segurança alimentar, hídrica, desenvolvimento sustentável e, em última análise, de investimento em sustentabilidade para as gerações futuras. É conhecendo os nossos solos por meio de investimento em levantamentos de solo e no PronaSolos que será possível, por exemplo, prevenir, mitigar ou reverter a degradação dos solos e ambiental, cujos alguns de seus impactos foram ampla e recentemente divulgados na mídia nacional. As “tempestades de poeira” e suas consequências à saúde pública, que atingiram municípios dos estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás e Mato Grosso do Sul, alarmando cidadãos e governantes locais, são parcialmente reflexos dessa degradação. Evento semelhante (*Dust Bowl*), mas em bem maiores extensão e montante, se deu nos Estados Unidos nos idos de 1930. Dentre as ações imediatas para conter o avanço da degradação ambiental e suas consequências socioeconômicas e à saúde pública, o governo norte-americano, à época, intensificou os levantamentos de

solos em todo o país em escalas compatíveis aos problemas enfrentados. A história mostra sinais e aponta tendências de fatos e ações que não devem ser ignorados.

Geomática, Inteligência Artificial e Computação Paralela de Alto Desempenho

Os avanços e a convergência tecnológica nos campos das Geotecnologias, da Inteligência Artificial e a Computação Paralela de Alto Desempenho estão abrindo enormes perspectivas para as Ciências Agrônomicas e Ambientais e, notadamente, para o monitoramento dos solos e das culturas. Extraordinários avanços nas geotecnologias no que tange à evolução do Sensoriamento Remoto a partir do desenvolvimento e lançamento de novas plataformas orbitais (satélites) e o aperfeiçoamento e o crescente uso dos Veículos Aéreos Não-tripulados (VANTs e/ou Drones), que operacionalizam sensores cada vez mais sofisticados, permitem a coleta massiva de dados diversos com alta ou altíssima resolução espaço-temporal.

Constelações de mini e nanossatélites e frotas de drones equipados com os mais diversos sensores imageadores – fotográficos, multiespectrais, hyperespectrais, LIDAR (Light Detection and Ranging) e SAR (*Synthetic Aperture Radar*) – fornecem imagens digitais precisas da superfície terrestre que se traduzem em informações úteis para análises, avaliações diagnósticas, mapeamento e monitoramento da vegetação, culturas e solos.

As fotografias digitais têm sido utilizadas para várias aplicações a partir das técnicas de reconhecimento de imagens (Image-Recognition) baseadas em algoritmos de aprendizado de máquina (*Machine e Deep-learning*) que possibilitam a identificação, localização e classificação de objetos específicos em cada imagem. Deste modo, se torna possível identificar diferentes objetos de interesse da aplicação como, a ocorrência de plantas invasoras, a morfologia fenológica das culturas (floração; frutificação), presença ou padrões de ataque de insetos-praga e/ou fitomoléstias, solo exposto e/ou padrões de erosão, etc.

As imagens multiespectrais podem fornecer informações diretas a partir do registro radiométrico das bandas espectrais ou, indiretas, a partir da aplicação dos muitos Índices de Vegetação (Vegetation Index) como: NDVI (Normalized difference vegetation index); EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Índice de Vegetação Ajustado ao Solo), dentre vários outros. Esses diferentes índices fornecem informações quali-quantitativas sobre a biomassa vegetal, nos permitindo inferir o vigor vegetativo dos alvos de interesse: vegetação natural, culturas agrícolas, pastagens, reflorestamentos, etc.

As abordagens baseadas nas análises de séries de dados temporais de imagens multiespectrais nos permite recompor a curva do desenvolvimento fenológico das culturas (assinatura espectral) e, assim, classificar o uso e a cobertura do solo em tipologias hierarquizadas: identificação de classes genéricas de uso e de tipos de vegetação (agricultura, floresta, savana, etc.), tipos de culturas (soja, milho, algodão, pastagem, etc.) e, por último, o que representa ainda uma fronteira em desenvolvimento, a detecção de sistemas de produção, como: plantio direto, sucessão de cultivos em

safrinha (double-crop); sistemas integrados de produção agropecuária (Lavoura-Pecuária-Floresta - ILPFs), etc.

Neste contexto, novos sensores a bordo de satélites como, o Sentinel 2A (Copernicus Programme/European Space Agency-ESA), o CBERS-04A (Programa CBERS/INPE; CAST), Planet (Constelação de nano-satélites Dove), dentre outros, prometem boas perspectivas, considerando o fornecimento de imagens com altas resoluções, espacial, temporal e radiométrica.

As imagens hiperespectrais, por sua vez, possibilitam, a partir das assinaturas espectrorradiométricas, a extração de informações inferenciais sobre a natureza e a composição dos materiais constituintes dos alvos de interesse. Deste modo, esta abordagem técnico-metodológica tem sido bastante empregada em pesquisas que visam inferir e mapear atributos físicos, químicos e mineralógicos dos solos, como por exemplo: carbono orgânico, textura, cor, mineralogia dos argilominerais, conteúdo de sesquióxidos de ferro e alumínio, nutrientes minerais, etc. Permite, também, a diagnose foliar de modo remoto, identificando os nutrientes minerais e as anomalias nutricionais das plantas de uma dada cultura.

Cabe esclarecer que, a despeito do grande potencial e impacto tecnológico para o monitoramento de atributos de plantas e solos, trata-se de um campo de pesquisa científica ainda em desenvolvimento e, na medida em que forem sendo disponibilizadas mais imagens hiperespectrais de maior resolução espaço-temporal, maiores serão os saltos evolutivos dessa promissora tecnologia.

Atualmente, os satélites de observação da Terra produzem todos os dias quantidades gigantescas de dados geoespaciais

(petabytes), com enorme potencial para a geração de informação útil. Apesar dos notáveis avanços da Geomática, que trata da aquisição, armazenamento, organização e análises desses dados, a capacidade de processamento e análise de grande massa de dados sempre constituiu uma limitação para a extração de informação e conhecimento em seu máximo potencial. Entretanto, com o advento dos métodos de análise de dados baseados em aprendizado de máquina (*machine learning*) as limitações de análise de grandes *datasets* têm sido superadas. Neste sentido, diversos algoritmos baseados em princípios distintos - Redes Neurais Artificiais (RNA), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Random Forest (RF), Redes Bayesianas (RB), dentre vários outros – conseguem “aprender com os dados”, extraíndo padrões do conjunto de dados e gerando informações de valor prático nos processos de tomada de decisão.

Acrescendo à capacidade analítica dos métodos de aprendizado de máquina a operacionalidade das plataformas de processamento computacional de alto desempenho (*Cloud parallel computing*), o problema do tratamento de enormes quantidades de dados, cada vez mais, está sendo superado, viabilizando assim o conceito do *Big Earth Observation Data Analytics*. Neste contexto, quantidades massivas de dados de observação da superfície da terrestre poderão ser transformados em informações e estas, por sua vez, em *insights* estratégicos por meio das soluções de *Business Intelligence*, potencializando a assertividade dos processos decisórios, aumentando a produtividade e minimizando os riscos.

Como riscos associados às tecnologias convergentes dependentes de conexão via internet podemos citar que os fatores limitantes para adoção em larga escala seriam a carência ou

deficiência de infraestrutura de conexão no meio rural (redes convencionais ou de fibra ótica) e o custo dos equipamentos (sensores, data loggers, etc). Como principal risco à adoção generalizada as tecnologias convergentes que integram as soluções na área da Geomática aponta-se a necessidade de capacitação técnica e consolidação de redes de prestadores de serviço especializados.

Caminhamos para um mundo cada vez mais conectado por meio da internet, integrando redes de sensores locais ou remotos, onde a coleta, o tratamento e o processamento de dados se darão de modo cada vez mais rápido e automático, gerando informações inteligentes para diversas aplicações em todos os campos de atuação, incluindo, por certo, a agricultura e suas relações com o meio ambiente.

Neste contexto, inúmeras oportunidades se abrem para a evolução da ciência dos solos e suas aplicações nos campos da edafologia e pedologia. Contudo, desafios ainda se impõem em termos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (P&DI) para aproveitar todo o potencial desse conjunto de dados na resolução de diversos problemas agronômicos e ambientais

Por fim, as soluções na era da Agricultura Digital se basearão cada vez mais na integração de tecnologias convergentes, provendo diversas soluções. No que tange a agronomia e a ciência dos solos, podemos listar as quatro principais áreas técnico-científicas que continuarão a se desenvolver gerando soluções inovadoras:

- **Big Earth Observation Data:** desenvolvimento do sensoriamento remoto da superfície terrestre provendo uma

multiplicidade de dados provenientes de satélites, microssatélites, nano satélites ou VANTs com multisensores óticos, espectrais; hiperespectrais; lidar; radar, associado ao desenvolvimento das técnicas de classificação de Imagens por meio de algoritmos de inteligência artificial e processamento de alto desempenho, aplicados à caracterização, diagnóstico e monitoramento de solos e covariáveis ambientais;

- **Internet of Things – IoT:** soluções tecnológicas a partir de rede de sensores sem fio captando os mais diversos dados sobre os solos e conectividade por meio de multiplataformas (smartphones, tablets, laptops, desktops) provendo informações úteis para a otimização do manejo dos solos visando redução de riscos e ganhos de produtividade;
- **Digital Soil Mapping:** desenvolvimento tecnológico e utilização crescente de sensores proximais baseados em diferentes princípios físicos e químicos para aquisição de dados, pedometria e mapeamento digital de atributos e propriedades de solos em escalas detalhadas tornando a agricultura cada vez mais precisa (Agricultura de Precisão);
- **SIGWebs:** desenvolvimento de plataformas digitais (SIGWeb) de compartilhamento de bases de dados de solos, especializados e multi-qualificados.

Pedologia e Pedometria no Século XXI

As principais tendências percebidas para os próximos anos na área de pedologia e pedometria são: uso

crescente de tecnologia da informação e ferramentas digitais; maior quantificação dos processos do solo; uso de bigdata advinda de bancos de dados compartilhados de solos, de sensores próximos e remotos; desenvolvimento e adoção de novos métodos de análise de solo menos poluentes, mais precisos e mais rápidos; desenvolvimento de novos métodos de caracterização espacial e mapeamento do solo, inclusive com uso de sensores próximos e remotos para aquisição de dados; conscientização sobre a importância do solo; e incentivo à formação de alianças regionais e globais e a projetos para o mapeamento de atributos do solo nas escalas continentais e global.

As ciências do solo, assim que como as ciências em geral, terão que direcionar esforços para a tecnologia da informação e para a dinâmica da sociedade 4.0. A necessidade de novos métodos analíticos para amostras de solo que sejam menos poluentes, mais baratos, acurados e rápidos, como a espectroscopia de infravermelho e a espectroscopia por fluorescência de raio X, é uma oportunidade importante para pesquisa e desenvolvimento nesse tema. Acredita-se que, nos próximos anos, a pedologia se apropriará dos novos conhecimentos e ferramentas de análise, como geotecnologias, ciência de dados e inteligência artificial, aproximando-se mais da pedometria.

Por outro lado, o risco de a tecnologia determinar os rumos da ciência, com o uso excessivo, indiscriminado e/ou sem critério científico de ferramentas de análise

quantitativa, notadamente as de aprendizado de máquina, em detrimento à ciência aplicada à resolução de problemas no campo; e produção e divulgação de informações imprecisas sobre o solo, configuram-se como preocupantes ameaças a pedologia e pedometria nos próximos anos.

Referências

- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, n. 1, p. 71-91, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.03.002>.
- BARCELO-ORDINAS, J. M.; CHANET, J.-P.; HOU, K.-M.; GARCÍA-VIDAL, J. A survey of wireless sensor technologies applied to precision agriculture. In: STAFFORD, J. V. (ed.). **Precision agriculture' 13**. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2013. p. 801-808. DOI: https://doi.org/10.3920/978-90-8686-778-3_99.
- BUCKMASTER, D. **Digital Ag systems in the US & possible lessons for Australia**. Sydney: Australian Farm Institute, 2016. Paper presented at Digital Disruption in Agriculture Conference, Sydney, Jun. 2016.
- CLIFFORD, D. **The role of digital agriculture in future world farming systems**. Sydney: Australian Farm Institute, 2016. Paper presented at Digital Disruption in Agriculture Conference, Sydney, Jun. 2016.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1/3, p. 11-43, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.10.005>.
- GAŁUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. M.; NAMIEŚNIK, J. Moving your laboratories to the field: advantages and limitations of the use of field portable instruments in environmental sample analysis. **Environmental Research**, v. 140, p. 593-603, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.05.017>.
- GOAP, A.; SHARMA, D.; SHUKLA, A. K.; KRISHNA, C. R. An IoT based smart irrigation management system using Machine learning and open source technologies. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 41-49, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.040>.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL (Estados Unidos). **Convergence**: facilitating transdisciplinary integration of life sciences, physical sciences, engineering, and beyond.

Washington, DC: The National Academies Press, 2014. DOI: <https://doi.org/10.17226/18722>.

POLIDORO, J. C.; COELHO, M. R.; CARVALHO FILHO, A. de; LUMBRERAS, J. F.; OLIVEIRA, A. P. de; VASQUES, G. de M.; MACARIO, C. G. do N.; VICTORIA, D. de C.; BHERING, S. B.; FREITAS, P. L. de; QUARTAROLI, C. F.; BREFIN, M. de L. M. S. (ed.). **Programa Nacional de Levantamento e Interpretação de Solos do Brasil (PronaSolos)**: diretrizes para implementação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2021. E-book. (Embrapa Solos. Documentos, 225). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/226841/1/CNPS-DOC-225-2021.epub>. Acesso em: 31 jan. 2022.

ROOPAEI, M.; RAD, P.; CHOO, K. R. Cloud of things in smart agriculture: intelligent irrigation monitoring by thermal imaging. *IEEE Cloud Computing*, v. 4, n. 1, p. 10-15, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCC.2017.5>.

SHARMA, D.; SHUKLA, A. K.; BHONDEKAR, A. P.; GHANSHYAM, C.; OJHA, A. A technical assessment of IOT for Indian agriculture sector. **International Journal of Computer Applications Proceedings**, n. 1, p. 1-5, 2016. IJCA Proceedings on National Symposium on Modern Information and Communication Technologies for Digital India, 2016. Disponível em: <https://research.ijcaonline.org/mictdi2016/number1/mictdi201601.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SMALL, B. Digital technology and agriculture: foresight for rural enterprises and rural lives in New Zealand. **Journal of Agriculture and Environmental Sciences**, v. 6, n. 2, p. 54-77, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.15640/jaes.v6n2a7>.

SPOHRER, J. C.; ENGELBART, D. C. Converging technologies for enhancing human performance: science and business perspectives. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1013, n. 1, p. 50-82, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1196/annals.1305.005>.

SUDDUTH, K. A.; HUMMEL, J. W.; BIRRELL, S. J. Sensors for site-specific management. In: PIERCE, F. T.; SADLER, E. J. (ed.). **The state of site-specific management for agriculture**. Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1997. cap. 10, p. 183-210. DOI: <https://doi.org/10.2134/1997.stateofsitespecific.c10>.

Literatura recomendada

WOLLSCHLÄGER, U.; AMELUNG, W.; BRÜGGEMANN, N.; BRUNOTTE, J.; GEBBERS, R.; GROSCH, R.; HEINRICH, U.; HELMING, K.; KIESE, R.; LEINWEBER, P.; REINHOLD-HUREK, B.; VELDKAMP, E.; VOGEL, H.-J.; WINKELMANN, T. Soil as a sustainable resources for the bioeconomy - BonaRes. **Geophysical Research Abstracts**, v. 19, p. 16569, 2017. Proceedings from the 19th EGU General Assembly, 2017, Vienna. Disponível em: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2017EGUGA..1916569W/PUB_PDF. Acesso em: 31 jan. 2022.

Capítulo 4. Bioeconomia e biotecnologia na Ciência do Solo

Fabiano de Carvalho Balieiro, Jerri Edson Zilli, Livia Abreu Torres e Silvia Kanadani Campos

O Brasil é detentor de cerca de 20% da biodiversidade do mundo, o que representa uma importante oportunidade para geração de valor. Contudo, para que esse ciclo se concretize, são necessários investimentos em biotecnologia e bioeconomia. A partir da biodiversidade é possível a obtenção de produtos como biomassa, corantes, óleos vegetais, fármacos, fitoterápicos, dentre outros.

A importância dessas áreas entretanto, vão além do aproveitamento da biodiversidade. A biotecnologia revolucionou a produção de alimentos. Na agricultura, é utilizada no melhoramento genético de plantas, para obtenção de variedade mais resistentes ou mais produtivas; e até mesmo para a produção de defensivos agrícolas.

A bioeconomia é a área do conhecimento voltada para a produção, utilização e conservação de recursos biológicos, visando fornecer produtos, processos e serviços sustentáveis (Global..., 2018)¹. Está voltada portanto para o desenvolvimento de produtos de base biológica, fármacos, vacinas, bioplásticos, biocombustíveis, produtos químicos de base biológica, cosméticos, alimentos e fibras (Torres et al., 2017), e inclui a agricultura, silvicultura, pesca, alimentos, produção de celulose e papel, bem como partes das indústrias químicas, biotecnológicas e de energia (European

Commission, 2014). A transformação da biomassa também adquire papel fundamental nesta área.

A interação entre a bioeconomia e a biotecnologia se dá de diversas formas. A aplicação da biotecnologia à produção primária, saúde e indústria resulta em uma bioeconomia onde a biotecnologia contribui para uma parcela significativa da produção econômica. Neste contexto, a bioeconomia em 2030 deverá envolver 3 elementos: conhecimento avançado de genes e processos celulares complexos, biomassa renovável e integração das aplicações biotecnológicas entre diferentes setores (OECD, 2009).

Nota-se assim uma interface grande entre a bioeconomia e a sustentabilidade. A bioeconomia surge como resultado de inovações na área das ciências biológicas envolvendo a transformação de recursos naturais em bens e serviços, com menor impacto sobre os recursos naturais (Confederação Nacional da Indústria, 2014; Torres et al., 2017).

Bioeconomia e Solos

Os solos são um recurso fundamental na transição para uma bioeconomia sustentável, sendo essenciais para garantir a entrega de vários serviços ecossistêmicos. Desta forma, existe amplo consenso sobre a importância dos solos e a necessidade de manejá-los de forma sustentável. Em contraste com a governança do uso de outros recursos naturais, que são considerados bens públicos, como a qualidade do ar ou a gestão da água, no caso dos solos, não há definições claras e as forma de apropriação e uso se baseiam nos direitos de propriedade. Apesar da governança do uso do solo ser um campo de pesquisa em desenvolvimento, esse tema

tem ganhado cada vez mais importância, já que molda a maneira como os solos são usados e, portanto, reflete as necessidades e interesses das gerações atuais e futuras (Juerges; Hansjürgens, 2018). Por exemplo, seja por preocupações sociais ou ambientais ou pelo risco e redução dos retornos dos ativos convencionais, investidores privados estão cada vez mais investindo em títulos verdes (*green bonds*) investimento financeiro especificamente destinado para arrecadar dinheiro para projetos climáticos e ambientais (Barret et al., 2020). Neste aspecto, novos instrumentos financeiros em investimentos de conservação estão sendo desenvolvidos, atraindo cada vez mais investimentos privados (Deutz et al., 2020).

De acordo com o grupo de trabalho internacional de economia sustentável (*International Sustainable Bioeconomy Working Group- ISBWG*), liderado pela FAO desde 2016, para a transformação de recursos naturais em bens e serviços, com menor impacto sobre os mesmos, é preciso garantir: i) conservação da biodiversidade; ii) mitigação e adaptação às mudanças do clima; iii) manutenção da qualidade e a quantidade da água e, quando quanto possível, melhoradas; e iv) a degradação da terra, solo, florestas e ambientes marinhos evitada, interrompida ou revertida (FAO, 2021).

Enormes progressos foram feitos pelos cientistas no sentido de compreender os organismos do solo e seus papéis nos ecossistemas, porém, ainda há muito a ser descoberto. Entender quais os fatores que causam mudanças na biodiversidade edáfica e, como ela se relaciona com as funções dos solos, bem como, influencia e é influenciada pelo uso e cobertura do solo, constitui um importante passo para sustentabilidade e restauração dos ecossistemas (Lisboa et al., 2013, 2014; Mendes et al., 2019). Da

mesma forma, compreender a formação estrutural do solo envolve aspectos da biologia, química, geologia e física, dentro do contexto do ambiente do solo (Brevik et al., 2015).

O solo abriga diversas e complexas comunidades microbianas que desafiam o conhecimento corrente. Compreender a plenitude dessas complexas associações microbianas, suas funções e atividade metabólica é de suma importância, contudo, sofisticados métodos e instrumentos serão necessários para detectar esses componentes, correlacionando-os às funções críticas do solo. O potencial de novas descobertas relacionadas à microbiota do solo poderá torná-lo importante provedor de genes, moléculas e metabólitos valiosos para a bioeconomia (Lopes, 2020). A microbiota do solo é responsável pela ciclagem de carbono, nitrogênio e muitos outros nutrientes essenciais que são necessários para a produtividade da lavoura (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019).

A potencial de novas descobertas tecnológicas a partir do pleno conhecimento sobre os microrganismos (bactérias, fungos e vírus) do solo é enorme e, pode ser considerado um dos mais importantes focos da pesquisa no campo da edafologia. Os investimentos nesse campo podem contribuir significativamente para melhorar a resiliência das culturas, reduzindo as perdas com nutrientes, secas, pragas e doenças (Chui et al., 2020).

Sementes tratadas por micróbios naturais (fungos e bactérias) e substituição de produtos químicos tradicionais por biometabólitos produzidos por microrganismos geneticamente modificados constituem exemplos reais de práticas fruto das pesquisas em microbiologia dos solos.

O potencial das aplicações da microbiologia do solo nos sistemas de produção agropecuários também é bastante vasto, com destaque para as áreas de bioinsumos agrícolas, biosequestro, biorremediação e tecnologias como CRISPR e TALEN que permitem adaptação de culturas às condições locais: umidade, tipo de solo, salinidade e temperatura (Chui et al., 2020).

A aplicação de técnicas moleculares modernas para avaliar a composição e função do microbioma do solo fornece, também, importantes informações sobre o impacto do manejo de terras agrícolas, podendo se tornar uma ferramenta valiosa na avaliação da saúde do solo. Acredita-se que a avaliação da estrutura e função do microbioma do solo, bem como seus outros indicadores de saúde, guiarão futuras decisões de gestão da conservação, contribuindo para uma agricultura mais resiliente, segurança alimentar mais estável, e melhores resultados ambientais (Kremer; Veum, 2020).

O investimento em bioeconomia, além de agregar valor aos produtos agropecuários e produzir um positivo impacto no meio ambiente, pode beneficiar a agricultura, aprimorando a capacidade de produção de alimentos, fibras, energia, serviços ecossistêmicos, química verde e novos insumos (Embrapa, 2018).

Para o Brasil, a bioeconomia é uma grande oportunidade. A microbiodiversidade dos solos tropicais e a aplicação de novos conhecimentos e tecnologias, possibilitam enorme potencial de inovação, geração de empregos, renda e desenvolvimento sustentável.

Bioteχνologia do Solo

Desde a publicação do livro *Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas*, de José Oswaldo Siqueira (UFLA) e Avílio Antônio Franco (Embrapa Agrobiologia), em 1988, pela Associação Brasileira de Ensino Agrícola Superior – ABEAS, a Ciência do Solo evoluiu muito no sentido de aplicar todo conhecimento e ferramentas da biotecnologia em soluções mais sustentáveis para o ambiente, e por que não, para nossas vidas.

Do melhoramento clássico às mutações induzidas, da tecnologia do DNA recombinante às ferramentas de engenharia genética, essa evolução nos levou a uma nova Era – a de “edição de genes”, capaz de melhorar culturas com adição precisa de *traits* - traços funcionais que se relacionam com a adaptação das plantas aos estresses ambientais como calor, seca ou resistência a pragas e melhoria da qualidade nutricional do alimento - ou a deleção daqueles defeituosos ou desinteressantes. Algumas dessas alterações não são consideradas “modificações genéticas artificiais”, ou seja, não passariam pelas normativas dos alimentos geneticamente modificados. Outras, que envolvem inserção de genes de forma artificial e produzem produtos transgênicos, necessitam ser melhor reguladas. A verdade é o que entendimento sobre esse assunto é diferente entre distintos grupos sociais e países e apesar de todos esses avanços e promessas frente aos desafios econômicos, sociais e ambientais, a regulação do uso dessas ferramentas, assim como a influência política e aceitação social precisam ser melhor debatidas (Lassoued et al., 2018). Essas técnicas já avançam no Brasil a passos largos, mas o debate precisa ganhar coro.

A biotecnologia tornou-se também fundamental para cientistas viabilizarem o uso de resíduos agrícolas ou da agroindústria em combustíveis, permitindo que energia limpa seja produzida, sem que

áreas de florestas naturais sejam derrubadas ou queimadas. Aliás, aproveitamento de resíduos da agropecuária faz parte de uma cadeia emergente que busca a ciclagem de nutrientes através da geração de novos produtos, indo de encontro aos conceitos de circularidade da bioeconomia em escala regionalizada.

Também com base na biotecnologia, a indústria de carne tem apostado, por meio da biotecnologia, na produção de “carne cultivada” (do inglês, *cultured meat* ou *lab-grow meat*). Além da economia em área, no consumo de água e energia, essa proteína não demanda antibióticos já que são produzidas em condições estéreis, o que chama atenção de consumidores mais exigentes. Porém muitos desafios técnicos ainda existem, especialmente no que diz respeito aos protocolos otimizados de cultura de células e no controle ou padronização da sua composição nutricional (Chriki; Hocquette, 2020). Segundo documento da Coalisão Internacional para Alimentação e Uso da Terra (Food and Land Use Coalition, 2019) essa fonte de proteína, assim como insetos, e outras de origem vegetais chegarão a 10% da demanda humana até 2030.

Os bioinsumos são também fortalezas da agricultura brasileira, cujo sucesso tem relação muito estreita com a biotecnologia do solo. O desenvolvimento de variedades de soja e estirpes de rizóbios adaptadas as condições de solos tropicais, ácidos e de baixa fertilidade, mas com elevada eficiência para fixação biológica de N₂ atmosférico, tornaram o país o maior produtor de soja do planeta, alcançando 128 milhões de toneladas na safra 2019/2020. Além de todos os benefícios sociais da cadeia produtiva, economizamos anualmente mais de 13 bilhões de dólares em fertilizantes nitrogenados, que não são aplicados às lavouras, tornando nossa

produção ambientalmente amigável (Hungria; Mendes, 2015; Hungria; Nogueira, 2019; Zilli et al., 2020).

Da possibilidade de sequenciamento de organismos do solo, identificação e de uso do seu potencial funcional surgem diferentes nichos de atuação, todos com benefícios para o homem e o ambiente. Organismos chamados de promotores de crescimento têm sido usados em lavouras ao redor do planeta com resultados promissores quando se pensa no desafio de alimentar 9,7 bilhões de pessoas até 2050 (Population..., 2019). A biotecnologia tem sido grande aliada da agricultura sustentável, na medida em que vem possibilitando a substituição de agroquímicos sintéticos-xenobióticos, com maior potencial poluidor em diferentes culturas do país e do mundo, por alternativas mais interessantes sobre o ponto de vista ambiental e social. A União Europeia, no âmbito do chamado “European Green Deal” idealizou uma estratégia de ação para melhorar a competitividade e resiliência de seus negócios, ao mesmo tempo que assegura a saúde e qualidade ambiental na produção de alimentos, sendo que a biotecnologia é um dos aliados. Segundo o programa “da Fazenda para Mesa” (do inglês, “from Farm to Fork”) a ideia é reduzir o uso de químicos e pesticidas mais perigosos em 50% até 2030, assim como o uso de fertilizantes em 20% e antibióticos em animais e na aquicultura em 50% (European Commission, 2020). As taxas de crescimento para o mercado de bioinsumos é estimada em cerca de 30% nos próximos cinco anos nos países da Europa e no Brasil pode ser superior a 50% neste mesmo período.

Assim como na União Europeia, as soluções biotecnológicas assumem no Brasil papel relevante na diminuição do uso de agroquímicos. O uso do microbioma do solo e da planta para

estimular processos como a fixação biológica de N₂, ou a produção de alimentos nutricionalmente mais ricos em vitaminas e o uso de feromônios no controle de praga são exemplos do uso da biotecnologia na segurança alimentar e conservação da biodiversidade, já que os defensivos químicos têm afetado drasticamente a abundância de insetos, inclusive aqueles relevantes à polinização.

Por último, mas não menos importante, vale reforçar que avanços em protocolos de avaliação da saúde do solo permitem produtores acompanhar suas lavouras e se práticas de produção adotadas estão compatíveis com a produção de alimentação seguros e saudáveis. Assim, metabólitos da atividade biológica do solo, como a atividade das enzimas beta-glucosidade e arilsulfatase do solo chegam aos laboratórios de rotina de análise químicas, colocando o país na vanguarda da avaliação do funcionamento biológico do solo (Lopes et al., 2013; Mendes et al., 2019).

Enfim, o “céu parece ser o limite” nesse século que se inicia, pois ferramentas de sequenciamento massivo de amostras de solo, de sedimentos e de plantas podem ser trabalhadas com metadados de múltiplas origens e confrontado às bibliotecas genômicas que se retroalimentam, facilitando o entendimento de processos chaves para conservação da própria biodiversidade, para a manutenção de ecossistemas. Muita expectativa e otimismo existe também acerca do papel da biotecnologia na mitigação e adaptação às mudanças do clima. A biologia sintética e a engenharia metabólica são campos da ciência com ampla sinergia na busca de soluções sustentáveis para a provisão de combustíveis, químicos e materiais diversos (Lopes, 2020).

Em suma, algumas tendências tecnológicas podem assim ser sintetizadas: i) desenvolvimento de variedades de plantas tolerantes a estresses bióticos e abióticos, mais responsivas a interação com microrganismos, assim como nutricionalmente equilibradas e mais produtivas, a partir de edição genômica e melhoramento de precisão aplicados; ii) estudos do microbioma da planta e do solo para identificação de organismos e moléculas derivadas destes e interações de interesse para os sistemas sustentáveis de produção; iii) uso de bioinsumos na agricultura auxiliando na redução de emissão de gases de efeito estufa e descarbonificação da agricultura; iv) aumento da oferta de bioinsumos de forma a mitigar as perdas de biodiversidade nas áreas rurais, aumentar a segurança alimentar e substituir ou complementar o uso de agroquímicos sintéticos; v) criação de biofábricas eficientes para produção de produtos químicos, remédios, combustíveis e outros materiais a partir da engenharia metabólica.

Referências

BARRETT, C. B.; BENTON, T.; FANZO, J.; HERRERO, M.; NELSON, R. J.; BAGEANT, E.; BUCKLER, E.; COOPER, K.; CULOTTA, I.; FAN, S.; GANDHI, R.; JAMES, S.; KAHN, M.; LAWSON-LARTEGO, L.; LIU, J.; MARSHALL, Q.; MASON-D'CROZ, S.; MATHYS, A.; MATHYS, C.; MAZARIEGOS-ANASTASSIOU, V.; MILLER, A.; MISRA, K.; MUDE, A. G.; SHEN, J.; SIBANDA, L. M.; SONG, C.; STEINER, R.; THORNTON, P. E.; WOOD, S.

Socio-technical innovation bundles for agri-food systems transformation: report of the International Expert Panel on Innovations to Build Sustainable, Equitable, Inclusive Food Value Chains. Ithaca: Cornell Atkinson Center for Sustainability; London: Springer Nature, 2020. Disponível em:

https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/110864/Bundles_agrifood_transformation-1.4.21.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

BREVIK, E. C.; CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; PEREG, L.; QUINTON, J. N.; SIX, J. VAN OOST, K. The interdisciplinary nature of soil. **SOIL**, v. 1, n. 1, p. 117-129, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-117-2015>.

CHRIKI, S.; HOCQUETTE, J.-F. The myth of cultured meat: a review. **Frontiers in Nutrition**, v. 7, 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00007>.

CHUI, M.; EVERS, M.; MANYIKA, J.; ZHENG, A.; NISBET, T. **The bio revolution: innovations transforming economies, societies, and our lives.** [S.l.]: McKinsey Global Institute, 2020. Disponível em: https://www.mckinsey.com/-/media/mckinsey/industries/life%20sciences/our%20insights/the%20bio%20revolution%20innovations%20transforming%20economies%20societies%20and%20our%20lives/may_2020_mgi_bio_revolution_report.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (Brasil). **Bioeconomia: oportunidades, obstáculos e agenda.** Brasília, DF: CNI, 2014. Disponível em: <<https://goo.gl/fj5jCb>>. Acesso em: 25 jun. 2021.

DEUTZ, A.; HEAL, G. M.; NIU, R.; SWANSON, E.; TOWNSHEND, T.; ZHU, L.; DELMAR, A.; MEGHJI, A.; SETHI, S. A.; TOBIN-DE LA PUENTE, J. **Financing nature: closing the global biodiversity financing gap.** Chicago: The Paulson Institute; Arlington: The Nature Conservancy; Ithaca: Cornell Atkinson Center for Sustainability, 2020. Disponível em: https://www.paulsoninstitute.org/wp-content/uploads/2020/10/FINANCING-NATURE_Full-Report_Final-with-endorsements_101420.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

EMBRAPA. **Visão 2030: o futuro da agricultura brasileira.** Brasília, DF, 2018. 212 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/194611/1/Visao-2030-o-futuro-da-agricultura-brasileira.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, The European Economic and Social Committee and the Committee of the regions: a farm to fork strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food system.** Brussels, 2020. COM(2020) 381 final. 19 p. Disponível em: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:ea0f9f73-9ab2-11ea-9d2d-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 11 nov. 2020.

EUROPEAN COMMISSION. **Where next for the European bioeconomy?** Brussels, 2014. DOI: <http://doi.org/10.2777/95624>.

FAO. **Aspirational principles and criteria for a sustainable bioeconomy.** Rome, 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/3/cb3706en/cb3706en.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2021.

FOOD AND LAND USE COALITION. **Growing better: ten critical transitions to transform food and land use.** [S.l.], 2019. Disponível em: https://www.foodandlandusecoalition.org/wp-content/uploads/2020/03/FOLU-Growing-Better-Report-Slides_web.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

GLOBAL BIOECONOMY SUMMIT, 2018, Berlin. **Communiqué.** Berlin: German Bioeconomy Council, 2018. Disponível em: <https://www.biooekonomierat.de/media/pdf/archiv/international-gbs-2018-communication.pdf?m=1637836879&>.

HUNGRIA, M.; MENDES, I.C. Nitrogen fixation with 2 soybean: the perfect symbiosis? In: BRUIJN, F. J. de (ed.). **Biological nitrogen fixation.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2015. cap. 99, p. 1005-1019. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119053095.ch99>.

HUNGRIA, M.; NOGUEIRA, M. A. Tecnologias de inoculação da cultura da soja: mitos, verdades e desafios. In: KAPPES, C. (ed.). **Boletim de Pesquisa 2019/2020**. Rondonópolis: Fundação MT, 2019. p. 50-62. (Fundação MT. Boletim, 19).

JUERGES, N.; HANSJÜRGENS, B. Soil governance in the transition towards a sustainable bioeconomy: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 1628-1639, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.143>.

KREMER, R. J.; VEUM, K. S. Soil biology is enhanced under soil conservation management. In: DELGADO, J. A.; GANTZER, C. J.; SASSENATH, G. F. (ed.). **Soil and water conservation: a celebration of 75 years**. Ankeny: Soil and Water Conservation Society, 2020. cap. 19, p. 203-211. Disponível em: https://www.swcs.org/static/media/cms/75th_Book_online_large_0D2D426346A86.pdf. Acesso em: 27 jan. 2022.

LASSOUED, R.; SMYTH, S. J.; PHILLIPS, P. W. B.; HESSELN, H. Regulatory uncertainty around new breeding techniques. **Frontiers in Plant Science**, v. 9, 1291, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01291>.

LISBOA, F. J. G.; CHAER, G. M.; JESUS, E. da C.; FARIA, S. M. de; GONÇALVES, F. S.; SANTOS, F. M.; CASTILHO, A. F.; BERBARA, R. L. L. The influence of litter quality on the relationship between vegetation and below-ground compartments: a procrustean approach. **Plant and Soil**, v. 367, p. 551-562, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1491-1>.

LISBOA, F. J. G.; PERES-NETO, P. R.; CHAER, G. M.; JESUS, E. da C.; MITCHELL, R. J.; CHAPMAN, S. J.; BERBARA, R. L. L. Much beyond mantel: bringing procrustes association metric to the plant and soil ecologist's toolbox. **Plos One**, v. 9, n. 6, e101238, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101238>.

LOPES, A. A. de C.; SOUSA, D. M. G. de; CHAER, G. M.; REIS JUNIOR, F. B. dos; GOEDERT, W. J.; MENDES, I. de C. Interpretation of microbial soil indicators as a function of crop yield and organic carbon. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 2, p. 461-472, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0191>.

LOPES, M. A. Segredos do microbioma do solo. **Radar Solos**, n. 1, p. 14, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/219399/1/Radar-Solos-Dezembro-2020.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

MENDES, I. de C.; SOUZA, L. M. de; SOUSA, D. M. G. de; LOPES, A. A. de C.; REIS JUNIOR, F. B. dos; LACERDA, M. P. C.; MALAQUIAS, J. V. Critical limits for microbial indicators in tropical Oxisols at post-harvest: The FERTBIO soil sample concept. **Applied Soil Ecology**, v. 139, p. 85-93, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.02.025>.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING, AND MEDICINE. **Science breakthroughs to advance food and agricultural research by 2030**. Washington, DC: The National Academies Press, 2019. DOI: <https://doi.org/10.17226/25059>.

POPULATION FACTS. New York: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, n. 2019/6, Dec. 2019. 4 p. How certain are the United Nations

global population projections? Disponível em:
https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/popfacts/PopFacts_2019-6.pdf.

TORRES, D. A. P.; FRONZAGLIA, T.; SANTANA, C. A. M.; ARAÚJO, D. L. M. de; BOLFE, E. L.; LOPES, D. B.; PENA JÚNIOR, M. A. G.; SANTOS, G.; HENZ, G. Cenas: bioeconomia: moldando o futuro da agricultura. In: MARCIAL, E. C.; CURADO, M. P. F.; OLIVEIRA, M. G. de; CRUZ JÚNIOR, S. C. da; COUTO, L. F. (ed.). **Brasil 2035: cenários para o desenvolvimento**. Brasília, DF: Ipea: Assecor, 2017. cap. 17, p. 219-238. Disponível em:

https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/170606_brasil_2035_cenarios_para_desenvolvimento.PDF. Acesso em: 20 jun. 2021.

ZILLI, J. E.; ALVES, B. J. R.; ROUWS, L. F. M.; ARAUJO, J. L. S. de; SOARES, L. H. de B.; CASSAN, F.; O HARA, G. The importance of denitrification performed by nitrogen-fixing bacteria used as inoculants South America. **Plant and Soil**, v. 451, p. 5-24, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04187-7>.

Literatura recomendada

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (Brasil). **O que é a bioeconomia?** Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/bioeconomia/>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SIQUEIRA, J. O.; FRANCO, A. A. **Biotecnologia do solo: fundamentos e perspectivas**. Brasília, DF: MEC: ABEAS; Lavras: ESAL: FAEPE, 1988. 235 p.

Nota

¹ O *Global Bioeconomy Summit* (GBS) é uma conferência internacional que acontece a cada dois anos, em que são discutidos oportunidades e desafios para a bioeconomia e visões para o desenvolvimento futuro da bioeconomia sustentável. Participam dessas discussões atores chave de governo, comunidade científica e de negócios e sociedade civil.

Capítulo 5. Intensificação da agricultura com sustentabilidade

Rosângela Straliozzo, Rachel Bardy Prado, Rodrigo Peçanha Demonte Ferraz, Margareth Gonçalves Simões, Ademir Fontana, José Eloir Denardin, Vanderlise Giongo, André Júlio do Amaral, Silmara Rossana Bianchi e Gizelle Cristina Bedendo

O crescimento populacional do mundo projeta um aumento da demanda por alimentos e produtos agrícolas que ocasionará pressões antrópicas ainda maiores sobre os recursos naturais solo, água e atmosfera. Para superar esse desafio, é inevitável a intensificação da agricultura em termos de produtividade, rentabilidade, competitividade, reduzindo a pressão predatória sobre os recursos naturais e, a expansão da fronteira agrícola. Será necessário aumentar a produtividade não apenas por unidade de área, mas por unidade de insumos que deverão ser precisa e eficientemente aplicados.

Nas últimas cinco décadas, a transformação de grandes extensões de terras consideradas inadequadas à produção agrícola mediante uso de corretivos e fertilizantes; o melhoramento genético das culturas, que permitiu o cultivo de duas ou mais safras por ano agrícola e o desenvolvimento de cultivares resistentes à pragas; o investimento na mecanização agrícola, e a adoção de práticas agrícolas conservacionistas como o sistema de plantio direto (SPD), modificaram profundamente o cenário agrícola nacional.

A agricultura brasileira vem demonstrando robustez, eficiência e competitividade. Entre 1971 e 2016, a produtividade total dos fatores (PTF)¹ da agricultura brasileira cresceu 2,8%, atrás apenas da China², com 3,6% (Estados Unidos, 2020), e está estimada em 2,9% para o decênio de 2021 a 2030 (Brasil, 2020a). O desempenho singular desses fatores, nas regiões de clima tropical e subtropical do Brasil, foi e vem sendo atingido com base na aplicação do conhecimento técnico-científico e no desenvolvimento de tecnologias que propiciaram não apenas saltos de produtividade, mas também de qualidade dos produtos produzidos. Desta forma, os produtos da agricultura brasileira, além de abastecer o mercado interno, estão também sendo exportados, somando US\$ 100,81 bilhões em 2020 (Brasil, 2021b), contribuindo com a segurança alimentar e promovendo o equilíbrio da balança comercial do País.

Apesar dos avanços, as estimativas da produtividade total dos fatores alertam que a produção agrícola não está crescendo rápido o suficiente para atender, com sustentabilidade à crescente demanda global por alimentos, fibras e bioenergia (Crouzeilles et al., 2019). A conquista da intensificação de sistemas de produção, com caráter de sustentabilidade, requer mais investimentos e incentivos em pesquisa e inovações nos processos agropecuários. O uso eficiente e a redução da degradação do solo, da poluição da água e da emissão de gases de efeito estufa na agricultura, a reinserção de terras degradadas aos sistemas de produção agropecuários, o desenvolvimento de metodologias de análise de solo e tecido vegetal baseados nos princípios da química verde, a inovação no desenvolvimento de novas fontes de fertilizantes e insumos agrícolas, tendentes aos bioinsumos, e tecnologias e processos agropecuários para promoção do melhor aproveitamento de

nutrientes pelas plantas são temas estratégicos para avanços neste campo que serão discutidos a seguir.

O Brasil tem hoje um dos maiores planos de agricultura sustentável do mundo (Brasil, 2021a). O Plano de Agricultura de Baixo Carbono (+ABC) considera cinco tecnologias com maior potencial de mitigação de gases de efeito estufa na agricultura brasileira: as contribuições da AC; o aumento da extensão de florestas plantadas; a recuperação de pastagens; a intensificação dos sistemas integrados de produção (iLPF – integração Lavoura-Pecuária-Floresta) e a fixação biológica de nitrogênio (FBN). A Rede iLPF estima a implantação dos sistemas em 35 milhões de hectares até 2030 (Rodrigues et al., 2021). Há quatro possibilidades de adoção desses sistemas integrados: iLP (integração Lavoura-Pecuária); iPF (integração Pecuária-Floresta); iLF (integração Lavoura-Floresta) e iLPF, sendo este último adotado por 83% dos agricultores (Rede ILPF, 2021).

Pressões e degradação do solo e da água no Brasil

A escassez hídrica mundial tem sido motivo de preocupação e discussão nos diferentes níveis da sociedade. A Organização das Nações Unidas estima que a demanda de água mundial vai aumentar em 50% até 2030. Embora possua grandes reservas de água doce, incluindo parte majoritária do Aquífero Guarani (70%), o Brasil está sujeito à distribuição da água de forma não homogênea tanto no espaço (região Norte 68,5%, região Centro-Oeste 15,7%, região Sul 6,5%, região Sudeste 6,0% e região Nordeste 3,3%) quanto no tempo (algumas regiões têm seu regime de chuvas concentrado em poucos meses, seguidos de longo período de

estiagem e rios intermitentes como é o caso do Semiárido do Nordeste). A distribuição de renda, a gestão hídrica, o montante de investimentos em infraestrutura e recursos humanos e outros aspectos socioeconômicos podem também influenciar a disponibilidade dos recursos hídricos. Estas diferenças naturais e sociais têm sido responsáveis pela situação de escassez hídrica no país (Prado et al., 2017).

O uso da água no meio rural representa 83% da demanda total brasileira, sendo 72% destinados para irrigação. A área irrigável no Brasil é de aproximadamente 29,6 milhões de hectares e o desperdício de água, estimado em 50% (perdas em sistemas inadequados ou vazamentos nas tubulações) é preocupante. A disponibilidade hídrica desses mananciais recebe os efeitos, positivos e negativos, afetando a oferta de água. Em termos de qualidade, apesar da poluição urbana ser a principal fonte de degradação, a poluição difusa de origem rural (elevada utilização de fertilizantes, pesticidas e perda de solos pelos processos erosivos) pode exercer impacto negativo em regiões com extensas áreas agropecuárias.

Também, as perdas anuais de solos no Brasil são da ordem de 500 milhões de toneladas pela erosão, ocasionando a perda média da capacidade de armazenamento dos reservatórios de 0,5% ao ano, considerada bastante elevada. Muitos rios chegam ao mar com uma vazão muito reduzida, em função do assoreamento, como é o caso do rio Paraíba do Sul e do rio São Francisco, essenciais para o abastecimento de água de grande parte da população brasileira (Prado et al., 2017). Adiciona-se a este cenário um passivo ambiental de 21 a 30 milhões de hectares a serem restaurados no Brasil, grande parte de pastagens degradadas (Sparovek et al.,

2010). Como consequência da contaminação e degradação dos solos e da água superficial e subterrânea, ocorrem prejuízos incalculáveis à biodiversidade terrestre e aquática, à saúde humana e à economia do país. Quantificar o grau de impacto e degradação do solo e da água pelas ações antrópicas no meio rural e propor soluções práticas, eficientes e de baixo custo, consiste em um dos maiores desafios da pesquisa agropecuária brasileira.

Uso eficiente do solo e da água na agricultura

De acordo com o relatório da FAO (2015) sobre o status do Recurso Solo no Mundo, foram identificadas 10 ameaças ou processos de ordem física, química ou biológica que dificultam o Manejo Sustentável dos Solos em áreas agrícolas listados a seguir: erosão hídrica e eólica; perda de carbono orgânico; desequilíbrio de nutrientes; salinização; contaminação; acidificação, perda da biodiversidade; selamento superficial, compactação e inundação. Essas ameaças variam em termos de intensidade e tendência dependendo do contexto geográfico local (FAO, 2017), todos estes processos precisam ser considerados para alcançar o uso eficiente dos Solos na agricultura. O fenômeno da erosão hídrica destaca-se pela sua extensão e abrangência considerado um processo irreversível que pode evoluir e tornar as áreas desertificadas a exemplo do que já ocorre em alguns núcleos de desertificação na região Nordeste. Controlar os processos erosivos em áreas agrícolas torna-se o principal desafio para o manejo sustentável dos solos agrícolas (FAO, 2019).

Diante do histórico de degradação da água no meio rural, é premente que medidas sejam tomadas tanto pelos produtores rurais, em nível de propriedade, bem como pelos tomadores de

decisão no nível da paisagem, de modo a assegurar a provisão de água para os usos múltiplos. Na propriedade, é importante que se faça a adequação ambiental conforme prevê o Código Florestal, devido ao papel essencial do componente arbóreo para a provisão de água. Também há diversas práticas conservacionistas capazes de melhorar a qualidade do solo, a infiltração e o fluxo de base que alimenta os mananciais superficiais de água no período de estiagem, a retenção de água na bacia hidrográfica, evitando-se ainda os processos erosivos. São eles: micro barragens, terraceamento, curvas de nível, além dos sistemas de cultivo conservacionistas.

Serão necessários esforços colaborativos e alianças estratégicas para promover o avanço da agricultura conservacionista (AC), com destaque para sistemas de produção que promovam o aporte contínuo de matéria orgânica ao solo a ciclagem de nutrientes e a regulação hídrica proporcionando maiores taxas de infiltração de água no solo (redução do escoamento superficial), bem como o uso de bioinsumos e a adubação verde. A promoção da adoção dessas tecnologias e sistemas de produção trará vantagens competitivas ao produtor brasileiro que poderá explorar novos nichos de mercado com oportunidades tanto para pequenos e médios quanto para grandes produtores rurais desde que os produtos atendam as legislações vigentes e, principalmente atendam às expectativas do consumidor que tende a ser cada vez mais exigente quanto aos critérios de sustentabilidade. Portanto, espera-se que no futuro a gestão do solo nas propriedades rurais seja otimizada, considerando que o solo é o substrato responsável por 95% da produção de alimentos que chega à mesa da população. No entanto, estabelecer métricas e mecanismos para avaliar e promover o uso e manejo eficiente do solo na agricultura com a promoção de serviços

ecossistêmicos considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais será de fundamental importância para o fortalecer ainda mais o setor agropecuário e florestal brasileiro. Desenhar, monitorar, valorar e demonstrar o manejo e a eficiência de sistemas agropecuários integrados e conservacionistas é papel dos pesquisadores da ciência do solo e sua ambiência.

A irrigação também precisa ser mais eficiente, fazendo-se uso dos métodos recomendados para cada tipo de solo e cultura, além do seu manejo a partir do monitoramento preciso da evapotranspiração, utilização de sistemas mais eficientes e adaptados às condições locais, evitando desperdício de água e energia, onde a pesquisa pode muito apoiar gerando tecnologias e métodos acessíveis aos diferentes tipos de produtores rurais. Em regiões cuja disponibilidade hídrica é muito variável, reservatórios de pequeno porte, barragens subterrâneas (Silva et al., 2007) e captação de água da chuva em propriedades agrícolas podem melhorar a disponibilidade hídrica, para atender aos usos múltiplos, reduzindo a vulnerabilidade em relação à variabilidade hidrológica (Prado et al., 2017). Também é importante promover o reuso da água na propriedade rural. Palhares et al. (2019) apresentam experiências de consumo de água na pecuária e, discutem o manejo de resíduos animais e sua utilização como fertilizante, bem como tecnologias disponíveis para reuso e tratamento da água.

Para conter as fontes de poluição pontuais da água no meio rural é preciso ainda um empenho, tanto do produtor para a construção de fossas sépticas, como dos gestores locais para investirem no tratamento dos efluentes domésticos e da agroindústria no meio rural (a pesquisa poderá contribuir com o monitoramento de baixo custo da qualidade da água). A Embrapa desenvolveu uma

tecnologia de baixo custo, denominada Fossa Séptica Biodigestora, que pode ser facilmente adotada no meio rural (Otenio et al., 2014).

Em relação às fontes difusas de poluição da água, em especial fertilizantes e pesticidas, é preciso avançar com a otimização da aplicação desses insumos e a pesquisa pode apoiar com ferramentas para avaliar e mapear de forma expedita a fertilidade dos solos bem como no controle integrado e biológico de pragas por meio do avanço das pesquisas em bioinsumos. A contenção dos processos erosivos contribuirá para a redução do assoreamento dos corpos hídricos e dos custos elevados do tratamento da água para o abastecimento, nesse aspecto a pesquisa poderá contribuir com o monitoramento e modelagem hidrológico e a valoração econômica. Ao pensar a paisagem rural, destaca-se a necessidade do planejamento no nível de bacias hidrográficas, com a elaboração e implantação de políticas de incentivo à proteção e restauração de matas ciliares e nascentes, adequação de estradas, bem como para nortear a destinação correta de resíduos sólidos e líquidos (Prado et al., 2017). A pesquisa tem potencial para apoiar, com ferramentas e métodos, as políticas, programas e projetos com foco na conservação da água no meio rural, como é o caso dos Pagamentos por Serviços Ambientais (Fidalgo et al., 2017).

Agricultura Conservacionista

A aprovação do Código Florestal Brasileiro foi um marco na legislação ambiental brasileira e o setor agropecuário tem preservado muito mais que o exigido por lei. Dados recentes mostram que, de 1970 até 2018, o chamado efeito “poupa-terra”, que reflete a área preservada em função do aumento da produtividade da agricultura brasileira, permitiu reduzir,

expressivamente, o avanço da agricultura sobre uma área de 775 milhões de hectares (Vieira Filho, 2019). Esse efeito “poupa-terra”, que envolve tecnologia para elevação da produtividade, rentabilidade, competitividade e preservação ambiental foi responsável pela preservação de áreas de campo e floresta em cerca de 26% na Região Sul, 29% no Sudeste e 49% no Centro-Oeste (Vieira Filho, 2019).

Dentre os principais avanços proporcionados pelo investimento em pesquisa pública e desenvolvimento pode-se citar: o melhoramento genético das culturas, responsável pela possibilidade do cultivo de duas ou mais safras anuais de grãos e o lançamento de cultivares resistentes às principais pragas, e a adoção em larga escala do Sistema de Plantio Direto (SPD), que constitui um dos pilares da agricultura conservacionista (AC) (Gasques, 2017). Pode-se ainda elencar o avanço no conhecimento dos solos tropicais e a consequente adequação de práticas e de sistemas de produção à capacidade de uso e aptidão agrícola das terras (Derpsch et al., 2010). Associa-se às práticas consideradas chave para o sucesso produtivo agrícola, como o manejo das Plantas – raízes e cobertura; do Solo - calagem, fertilização e agregação e da Água – infiltração e retenção.

A intensificação da agricultura com sustentabilidade é uma condição a ser atingida, mediante adoção de sistemas de produção compostos por cultivos que busquem manter o solo permanentemente coberto com plantas vivas, superando a visão tradicional de safras com limites temporais. É mediante a adoção do SPD, dotado do rigor dos preceitos que verdadeiramente o elegem como ativo tecnológico de cunho conservacionista, que os cultivos, envolvendo diversificação de espécies, estruturada em sistemas

integrados, permite a utilização integral dos recursos disponíveis na terra. Associam-se às práticas consideradas chave para o sucesso da intensificação da agricultura: manejo de plantas aporte de biomassa ao solo em quantidade, qualidade e frequência compatível com a demanda biológica do solo; manejo do solo - correção dos indicadores químicos da fertilidade do solo e estabilização estrutural do solo; manejo da água – infiltração e retenção de água no solo; e manejo dos fluxos de gases do solo – interceptação dos ciclos biogeoquímicos do carbono e do nitrogênio (Denardin et al., 2012).

São inúmeros os desafios a serem superados e as estratégias ofertadas para a consolidação da AC, nas diferentes regiões do País, visando imprimir caráter de sustentabilidade nos sistemas agrícolas brasileiros. Dentre esses, incluem-se apoio por políticas públicas, envolvendo capacitação tecnológica, transferência de tecnologia e programas de crédito ou incentivos diversos.

O futuro da intensificação passa da super produção e de intensidade por área para o atingimento do máximo potencial das terras (solo, espécies, agricultor – acesso à tecnologia e ao conhecimento, infraestrutura disponível), racionalização dos insumos – ciclagem e reciclagem de nutrientes, conservação do solo e da água e biodiversidade. Por fim, a intensificação é uma condição dependente dos fatores de produção, por meio do planejamento e monitoramento dos sistemas produtivos, pelo manejo e práticas conservacionistas e da gestão de riscos econômicos dos fenômenos naturais adversos.

Investimentos devem ser feitos em melhoria da infraestrutura e logística, na promoção de novos mercados externos e na elaboração de políticas agrícolas (crédito, seguro, armazenagem,

garantia de renda, economia de baixo carbono, fomento à produção de biocombustíveis, sucessão empresarial das fazendas familiares, irrigação, educação, crédito e assistência técnica e extensão rural etc.) mais eficientes, que atendam os produtores rurais.

Reinserção de terras degradadas aos sistemas de produção agropecuários

De acordo com estimativas da FAO (2015), cerca de 33% das áreas de produção agropecuária existentes no mundo atualmente encontram-se com algum grau de degradação. Diversas são as causas da degradação dos solos agricultáveis ao redor do mundo, constituindo-se assim, em maior ou menor grau, um problema para todos os países produtores. Tais causas se relacionam à combinação de fatores naturais, como à suscetibilidade dos solos à degradação, com atividades antrópicas relacionadas aos tipos de uso e manejo do solo. Dentre os fenômenos que mais conduzem à degradação dos solos, destaca-se a erosão hídrica como um dos processos mais atuantes, sobretudo nas regiões tropicais cujo regime de precipitação apresenta, normalmente, altos níveis de erosividade (Lal, 2001, 2017; Guerra; Jorge, 2014; García-Ruiz et al., 2017). Os processos erosivos causam a degradação física, química e biológica dos solos condicionando a perda da fertilidade natural e da capacidade produtiva dos solos. Como destacam Lal e Stewart (1990), a degradação dos solos agricultáveis por erosão põe em risco a segurança alimentar, constituindo ainda um dos maiores desafios a ser enfrentado pela humanidade.

Estima-se que o Brasil possui cerca de 180 milhões de hectares de pastagens sendo que pelo menos 50% dessas áreas encontram-se em algum estágio de degradação, que poderão ser alvo da

implementação de sistemas integrados que preconizam um conjunto de tecnologias alinhadas com os princípios da AC, tendo o SPD como sistema basilar, envolvendo a produção agrícola, pecuária e florestal na mesma área, em sistemas de consorciação, rotação ou sucessão de culturas (Rodrigues et al., 2021).

A adoção desses sistemas implica na superação de barreiras econômicas, tecnológicas e ambientais, envolvendo capacitação técnica implementação de sistemas produtivos, econômica e ambientalmente viáveis, para os diferentes estratos fundiários das diferentes regiões agroecológicas do País (Rodrigues et al., 2021).

Deste modo, a manutenção ou recuperação da capacidade produtiva dos solos emergem como um imperativo, colocando a questão no centro da discussão sobre a sustentabilidade da agricultura mundial. A questão envolvendo a degradação dos solos agrícolas tem ganhado relevância nas agendas políticas e científicas em diversos fóruns ao redor do mundo. Neste contexto, a Organização da Nações Unidas (ONU) proferiu, no âmbito dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), o objetivo de número 15: “Proteger, recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres, gerir de forma sustentável as florestas, combater a desertificação, deter e reverter a degradação da terra e deter a perda de biodiversidade”; que explicitamente faz menção à problemática em tela. A mesma Agência, por meio da FAO, lançou as Diretrizes Voluntárias para as Políticas Agroambientais (FAO/ONU) que, dentre vários objetivos, destaca a questão da degradação dos solos. Entidades científicas como o Global Soil Partnership (GSP) recorrentemente têm destacado a questão da necessidade de conservação dos solos. Políticas públicas, no âmbito nacional, também têm expressado preocupação com a

degradação dos solos, como o Programa ABC (Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento- MAPA); o Programa Águas do Agro (MAPA) e os Programas Estaduais de Microbacias.

Atualmente no Brasil, encontram-se vastas áreas abandonadas, subutilizadas com pastagens degradadas ou com culturas agrícolas de baixo rendimento, sem o devido e efetivo controle da erosão, gerando, em média, a perda anual de 15 a 20 toneladas de solos férteis por hectare (Hernani et al., 2002). A depleção da capacidade produtiva dos solos na maioria das regiões de produção agropecuária do país decorre de fatores naturais e antrópicos, notadamente, a susceptibilidade natural dos solos à erosão em associação ao manejo inadequado e/ou à adoção de sistemas de produção sem considerar a aptidão agrícola das terras. Pondo em risco a sustentabilidade do setor agropecuário, a degradação dos solos gera impactos socioeconômicos diretos nas populações rurais que dependem das cadeias de produção e impactos em diversos serviços ecossistêmicos, notadamente no ciclo do carbono, dos nutrientes e da água.

Sendo assim, se faz necessário investir na prevenção, mitigação e na reversão da situação de degradação geral dos solos agricultáveis em todo o Brasil. O desafio consiste na reinserção de extensas áreas ocupadas em maioria com pastagens degradadas à cadeia de produção agropecuária, por meio da introdução de sistemas de produção tecnicamente avaliados, sustentáveis e adequados a cada realidade socioambiental. Desafio este que exige a articulação de ações em diferentes planos de atuação no âmbito da pesquisa agronômica, capacitação técnica, transferência de tecnologia e implementação de políticas públicas de fomento e financiamento.

Neste contexto, os programas de pesquisa, desenvolvimento, inovação (PD&I) e transferência de tecnologia (TT), assumem relevante importância no tocante à operacionalização dessas políticas. Em termos de PD&I, pode-se individualizar duas frentes básicas de atuação. A primeira diz respeito à caracterização e avaliação diagnóstica dos processos e níveis de degradação, considerando a heterogeneidade ambiental de cada região determinada pelas características topográficas, climáticas e, sobretudo, pela diversidade taxonômica dos solos. A segunda se concentra na disponibilização de soluções técnicas para os problemas diagnosticados. Desta forma, no plano agrônomo, os desafios e as oportunidades residem notadamente no desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção agropecuária integrados e adaptados às realidades regionais, considerando as características das cadeias produtivas e o perfil dos produtores de cada região.

Neste sentido, o desenvolvimento de pesquisa interdisciplinar e colaborativa, com o envolvimento dos atores locais, baseada na avaliação do problema e nas soluções recomendadas pode gerar resultados mais assertivos. Além da adaptação dos sistemas de produção a cada situação regional, há a necessidade de fomentar a pesquisa para o desenvolvimento de insumos em suporte às iniciativas de recuperação e reinserção de áreas degradadas as cadeias produtivas. A introdução de insumos de menor custo, como bioinsumos (economia biológica) produzidos a partir de fontes disponíveis localmente, assim como, o melhoramento genético de variedades, considerando à adaptação em áreas degradadas, podem configurar estratégias interessantes de pesquisa visando o barateamento da recuperação das áreas degradadas.

Em relação ao desenvolvimento de metodologias para a avaliação diagnóstica dos níveis de degradação e monitoramento de áreas degradadas, deve-se ponderar que devido a heterogeneidade das áreas em degradação, a detecção e caracterização remota dos solos/pastagens degradados ainda se configura um desafio, prescindindo de esforços de pesquisa e desenvolvimento metodológico. Metodologias estas que podem ser aplicadas às múltiplas escalas espaciais, do local ao regional.

A reinserção das áreas com solos degradados, mas ainda com potencial produtivo, às cadeias de produção é essencialmente uma questão de planejamento estratégico de interesse multisetorial que deve envolver agentes de governo, da pesquisa e tecnologia e do setor produtivo. A reinserção de vastas áreas, antes abandonadas ou subutilizadas, trará, certamente, vantagens excepcionais ao país na medida em que se aumenta a área de produção recuperando os passivos socioeconômicos e ambientais historicamente legados. Além disso contribui com as questões ambientais, diminuindo as emissões de GEE e a pressão sobre os remanescentes de vegetação nativa legalmente passíveis de serem incorporados às áreas de produção agropecuária,

Contudo, no plano político-institucional, diversos desafios se interpõem às políticas e programas de estado orientados à promoção da conservação e recuperação de solos agrícolas com vistas à reinserção de áreas degradadas à cadeia produtiva, entre eles: carência de programas abrangentes para a recuperação e conservação dos solos; descontinuidade das políticas públicas; ausência de garantias financeiro-orçamentárias; falta e/ou adequação de linhas de crédito financeiro aos produtores;

necessidade de extensão rural e assistência técnica especializada; necessidade de coordenação política entre os entes federativos.

Desta forma, é preciso fomentar o planejamento agroambiental, as práticas conservacionistas a partir da articulação e da implementação de políticas de manejo sustentável do solo, promovendo maior integração entre os setores e instituições de governança, pesquisa e transferência de tecnologia potencializando os investimentos conjuntos dos setores públicos e privados. Neste contexto se somam políticas que possam fomentar a capacitação de técnicos, formação de recursos humano, transferência de tecnologia, o estabelecimento de arranjos sociais que promovam a conservação e recuperação do solo, a autogestão ou gestão participativa e a certificação das propriedades rurais que adotem as práticas conservacionistas. No campo tecnológico destaca-se a necessidade de se promover a conectividade rural e a disponibilização de ferramentas de apoio a decisão e no financeiro a abertura de linhas de crédito voltado para conservação e/ou recuperação da capacidade produtiva dos solos.

Química verde

Com o aumento das atividades industriais, desde a década de 40, a preocupação com o meio ambiente tem aumentado (De Marco et al., 2019) e desde então as empresas têm buscado adotar procedimentos e processos mais sustentáveis.

Dentro da área da Química não foi diferente, e na década de 90 Anastas e Warner apresentaram os 12

Princípios da Química Verde, que em resumo consiste na busca, desenvolvimento e aplicação de produtos e métodos que possam ser menos agressivos ao homem e ao meio ambiente, visando a redução ou não utilização de solventes tóxicos, e conseqüentemente a não geração de resíduos provenientes de processos químicos (Anastas, 1999; De Marco et al., 2019).

A fim de responder às demandas da química verde, a química analítica vem direcionando esforços para miniaturização de técnicas que por consequência geram menos resíduos e, também, novas técnicas de análise que aliadas a equipamentos sofisticados e tecnologias podem, inclusive, ser totalmente livres de resíduos químicos, como a análise direta sem manipulação das amostras. Outra tendência que vem acompanhando e auxiliando nesse cenário é a automatização das análises, contribuindo para o uso mais racional e em menor escala dos reagentes em comparação com os procedimentos tradicionais.

A matriz solo se apresenta como um desafio nesse contexto. Contudo soluções baseadas em espectroscopia de infravermelho próximo e fotônica auxiliadas por big data e inteligência artificial têm surgido como ferramentas que permitem a análise de parâmetros como matéria orgânica, física do solo (areia e silte), textura do solo, pH e chegando até a presença de folhas, fertilizantes minerais e orgânicos e contaminantes de acordo com fornecedores da solução baseada em fotônica. Além dos preceitos de ausência de solventes, essas novas soluções trazem

benefícios quanto a rapidez, custo e automação das análises.

Os métodos que envolvem espectrometria de fluorescência de raios (XRF), também contribuem nesse cenário e, podem ser considerados uma ferramenta analítica quantitativa e qualitativa, que oferecem análises rápidas e não destrutivas usando procedimentos limpos que podem ser aplicados rotineiramente a amostras sólidas, como solos, plantas e fertilizantes (Bendicho et al., 2012).

Ainda que seja observado o surgimento dessas novas tecnologias, algumas determinações importantes permanecem sendo realizadas com o uso de reagentes. Desta forma, com permanência da necessidade e a preocupação crescente sobre o impacto de solventes tóxicos ao ambiente, novos solventes sustentáveis têm sido desenvolvidos, dentre eles os solventes eutéticos profundos naturais, os NADES (do inglês, Natural Deep Eutectic Solvents), que são formados por metabólitos primários e/ou compostos celulares como aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares ou derivados de colina. Esses compostos apresentam biodegradabilidade, baixa toxicidade, são estáveis, de baixo custo e preparo simples. Esses solventes têm sido utilizados na extração de analitos inorgânicos (macro, micronutrientes e contaminantes inorgânicos), em amostras de interesse agrônômico (Santana et al., 2020).

Por fim, notadamente a preocupação intrínseca que a comunidade científica apresenta quanto a sustentabilidade do solo é estendida para que as análises dessa matriz, e outras relacionadas, para que sejam realizadas com menor impacto possível. Nesse sentido, as novas tecnologias que permitem análises com uso mínimo ou nenhum de reagentes químicos têm despontado como tendências assim como análises relacionadas, a exemplo da bioanálise de indicadores enzimáticos, que surgem como uma importante ferramenta complementar para avaliação da saúde do solo e contemplando os princípios da química verde.

Referências

ANASTAS, P. T. Green chemistry and the role of analytical methodology development. **Critical Reviews in Analytical Chemistry**, v. 29, n. 3, p. 167-175, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1080/10408349891199356>.

BENDICHO, C.; LAVILLA, I.; PENA-PEREIRA, F.; ROMERO, V. Green chemistry in analytical atomic spectrometry: a review. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 27, n. 11, p. 1831-1857, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1039/C2JA30214D>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Brasil deve ser destaque mundial no uso de bioinsumos nos próximos anos**. Brasília, DF: Mapa, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/brasil-deve-ser-destaque-mundial-no-uso-de-bioinsumos-nos-proximos-anos>. Acesso em: 13 jul. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Exportações do agro ultrapassam US\$ 100 bilhões pela segunda vez na história**. Brasília, DF: Mapa, 2021b. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/exportacoes-do-agro-ultrapassam-a-barreira-dos-us-100-bilhoes-pela-segunda-vez>. Acesso em: 14 jul. 2021.

CROUZEILLES, R.; RODRIGUES, R. R.; STRASSBURG, B. B. N. (ed.). **Relatório temático sobre restauração de paisagens e ecossistemas**. São Carlos, SP: Editora Cubo, 2019. Disponível em: https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2019/10/Relatorio_Restauracao_VF.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

DE MARCO, B. A.; RECHELO, B. S.; TÓTOLI, E. G.; KOGAWA, A. C.; SALGADO, H. R. N. Evolution of green chemistry and its multidimensional impacts: A review. **Saudi Pharmaceutical Journal**, v. 27, n. 1, p. 1-8, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.011>.

DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R. A.; FAGANELLO, A.; SANTI, A.; DENARDIN, N. A.; WIETHÖLTER, S. **Diretrizes do sistema plantio direto no contexto da agricultura conservacionista**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2012. 15 p. (Embrapa Trigo. Documentos online, 141). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/91357/1/2012-documentosonline-141.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

FAO. **Manual de agricultura climaticamente inteligente**: resumen de orientación. Rome, 2015. Disponível em: <https://www.fao.org/climatechange/37495-0edc2355c27f19ee5cee068a90496add9.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2022.

FAO. **Soil erosion**: the greatest challenge to sustainable soil management. Rome, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca4395en/ca4395en.pdf>.

FAO. **Voluntary guidelines for sustainable soil management**. Rome, 2017. Disponível em: <https://www.fao.org/3/i6874en/i6874EN.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

FIDALGO, E. C. C.; PRADO, R. B.; TURETTA, A. P. D.; SCHULER, A. E. (ed.). **Manual para pagamento por serviços ambientais hídricos**: seleção de áreas e monitoramento. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 78 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160960/1/Manual-PSA-hidricos-2017.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

GARCÍA-RUIZ, J. M.; BEGUERÍA, S.; LANA-RENAULT, N.; NADAL-ROMERO, E.; CERDÀ, A. Ongoing and emerging questions in water erosion studies. **Land Degradation & Development**, v. 28, n. 1, p. 5-21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2641>.

GASQUES, J. G. Sources of growth in Brazilian agriculture: total factor productivity. **EuroChoices**, v. 16, n. 1, p. 24-25, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/1746-692X.12146>.

GUERRA, A. J. T.; JORGE, M. do C. O. (org.). **Degradação dos solos no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2014.

LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, v. 12, n. 6, p. 519-539, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.472>.

LAL, R. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In: LAL, R. (ed.). **Soil erosion research methods**. Boca Raton: Routledge, 2017. cap. 1. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203739358>.

OTENIO, M. H.; SOUZA, F. de F. C. de; LIGÓRIO, P. P. L.; FAZZA, E.; SOARES, G.; BERNARDO, W. F.; MAGALHAES, V. M. A. de. **Como montar e usar a fossa séptica modelo Embrapa**: cartilhas adaptadas ao letramento do produtor. Brasília, DF: Embrapa, 2014. 41 p. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/116734/1/Cnpgl-2014-Cartilha-Fossa-Septica-completa.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

PRADO, R. B.; FORMIGA-JOHNSON, R. M.; MARQUES, G. Uso e gestão da água: desafios para a sustentabilidade no meio rural. **Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 43, n. 2, p. 43-48, maio/ago. 2017. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/167338/1/2017-043.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

REDE ILPF. **ILPF em números**. 2021. Disponível em: <https://www.redeilpf.org.br/index.php/rede-ilpf/ilpf-em-numeros>. Acesso em: 13 mar. 2021.

RODRIGUES, R. de A. R.; FERREIRA, I. G. M.; CORDEIRO, F. R. Carbon market potential in crop-livestock-forest integration systems. In: WORLD CONGRESS ON INTEGRATED CROP-LIVESTOCK-FORESTRY SYSTEMS, 2., 2021. **WCCLF 2021 proceedings**. Brasília, DF: Embrapa, 2021. p. 933-937. WCCLF 2021. Evento online. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/230916/1/Carbon-market-potential-in-crop-livestock-forest-integration-systems-2021.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2022.

SANTANA, A. P. R.; ANDRADE, D. F.; GUIMARÃES, T. G. S.; AMARAL, C. D. B.; OLIVEIRA, A.; GONZALEZ, M. H. Synthesis of natural deep eutectic solvents using a mixture design for extraction of animal and plant samples prior to ICP-MS analysis. **Talanta**, v. 216, 120956, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2020.120956>.

SILVA, M. S. L. da; MENDONÇA, C. E. S.; ANJOS, J. B. dos; FERREIRA, G. B.; SANTOS, J. C. P. dos; OLIVEIRA NETO, M. B. de. **Barragem subterrânea**: uma opção de sustentabilidade para a agricultura familiar do semi-árido do Brasil. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2007. 10 p. (Embrapa Solos. Circular técnica, 36). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPS-2010/13083/1/circtec36-2007barragem.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2022.

SPAROVEK, G.; BERNDDES, G.; KLUG, I. L. F.; BARRETTO, A. G. O. P. Brazilian agriculture and environmental legislation: status and future challenges. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 16, p. 6046-6053, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1021/es1007824>.

VIEIRA FILHO, J. E. R. Sustentabilidade produtiva do agronegócio brasileiro. In: VIEIRA FILHO, J. E. R. (org). **Diagnóstico e desafios da agricultura brasileira**. Rio de Janeiro: Ipea, 2019. p. 11-27. Disponível em: https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/livros/livros/191126_diagnostico_e_desafios_da_agricultura_brasileira.pdf. Acesso em: 31 jan. 2022.

Notas

¹ A PTF pode ser interpretada como o aumento da produção agrícola que não é explicada pelo aumento da quantidade dos insumos, mas sim pelos ganhos de produtividade destes, ou seja, a PTF mede a relação entre o produto total e o insumo total utilizado.

² Quando se consideram os principais países produtores agrícolas.

Capítulo 6. Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais

Rosângela Stralotto, Paulo César Teixeira, José Carlos Polidoro e Vinicius de Melo Benites

O país importa mais de 80% dos fertilizantes que consome. O ano de 2022 iniciou com aumento na cotação desses produtos no mercado interno e externo, devido à fatores comerciais e políticos que impactaram os principais países fornecedores desses insumos, tais como a China, Marrocos, Rússia e Bielorrússia. Um cenário de baixa disponibilidade de matérias-primas e alta de preços pode comprometer seriamente, e até inviabilizar, alguns setores da agropecuária nacional a médio prazo. O custo operacional efetivo da produção de soja na safra 2020/21 foi cerca de 17% maior que na safra anterior, a depender da região (Confederação Nacional da Agricultura, 2021). Além disso, a alta dependência por importação deixa o país vulnerável a uma crise mundial de abastecimento de fertilizantes, uma tragédia anunciada que se avizinha e de amplo conhecimento pelos envolvidos no setor, tanto pelos pesquisadores, especialistas, gestores e setor produtivo. A configuração deste cenário pode trazer sérios prejuízos para o país, uma vez que o agronegócio foi responsável por 30% do PIB brasileiro na última década. Nesse capítulo passaremos a discutir as principais *tendências* que deverão impulsionar a pesquisa e inovação na área de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes, na busca de soluções que se configuram urgentes e, ao mesmo tempo,

dependentes de esforços conjuntos da iniciativa pública, privada e de políticas públicas integradas para a superação deste gargalo para o setor agrícola brasileiro.

Nutrientes para Intensificação Sustentável da Agricultura

A produtividade continuará sendo o principal fator impulsionando o crescimento da produção de alimentos, fibras e biocombustíveis nos próximos anos. As projeções de produção e área plantada para o biênio 2029-2030 confrontadas com os dados observados no biênio 2019-2020 indicam aumento na produção de grãos em 26,29% com apenas 16,7% de expansão na área (Brasil, 2020). Esses números representam uma taxa anual de crescimento de 2,4% na produtividade das lavouras de grãos. Foram feitas projeções dos índices de produtividade total dos fatores (PTF), e verificou-se que a taxa média de crescimento para o próximo decênio deve ficar em 2,93% (Brasil, 2020), além disso, as projeções indicam tendência de redução de área de pastagem nos próximos anos (Brasil, 2018, 2020). O aumento da produtividade das culturas depende do uso de insumos e tecnologias. Ajustes de função de produção aos dados de produtividade da agricultura brasileira indicam que a tecnologia é o norteador da produção, dominando em muito terra e trabalho (Brasil, 2020).

Os insumos agrícolas de maior impacto na produtividade são os fertilizantes e corretivos agrícolas, especialmente considerando as áreas tropicais com solos naturalmente ácidos e de baixa fertilidade, que exigem a correção e a reposição sistemática de nutrientes para garantir a produção vegetal sustentável. A agricultura desempenha um papel essencial na mitigação das mudanças do clima: pelo

menos 40% dos solos do mundo são usados como terras agrícolas ou pastagens e o uso de fertilizantes pode contribuir para o sequestro de carbono do solo, aumentando a produtividade da biomassa (Hijbeek et al., 2019) e evitando o desmatamento.

Os fertilizantes podem responder por até 32% do custo de produção da soja, 27% do milho e 19% da cana de açúcar, a depender da região, podendo atingir quase 50% se considerarmos somente o custeio (Farias et al., 2020; IMEA, 2021). Há grande influência dos preços da matéria-prima internacional e das commodities agrícolas, além da cotação do petróleo, na formação de preços de adubos fosfatados (Beraldo; Figueiredo, 2016). O Brasil, quarto maior consumidor de fertilizantes do mundo, atrás da China, Índia e EUA (IFA, 2020b), é muito dependente das importações de fertilizantes para suprir o mercado interno. Em 2019, as importações brasileiras deste insumo chegaram a 85% (Anuário..., 2020), no entanto, o quadro tem se agravado e em 2021, 72% do fósforo (P), 94% do nitrogênio (N) e 96% do potássio aplicados na agricultura brasileira foram importados (Brasil, 2021b). No ano de 2020, a importação de fertilizantes totalizou 29,4 milhões de toneladas, volume 11% superior aos 26,4 milhões registrados em 2019 (GlobalFert, 2021). Os produtos à base de NPK se destacaram pelos recordes de importação, sendo os maiores volumes dos últimos cinco anos. As projeções para 2050 indicam uma rápida expansão no consumo de fertilizantes nas próximas décadas (Marin et al., 2016) apontando para a necessidade de inovações nesta área.

Neste contexto, a oferta de crédito em vista as incertezas climáticas, a redução da dependência internacional para esses insumos e o aumento da eficiência no uso dos fertilizantes serão

fundamentais. Este último fator depende fortemente de investimentos em tecnologias, novos produtos e processos mais eficientes para produção e aproveitamento dos fertilizantes pelas plantas.

Segundo Teixeira et al. (2019), algumas tendências desta área são: a) desenvolvimento de tecnologias com uso de resíduos (principalmente orgânicos); b) crescimento de “ferramentas biológicas” ou bioinsumos; c) maior importância às características físicas dos produtos finais (materiais de qualidade, bem projetados e duráveis); d) controle das perdas de nitrogênio por volatilização e/ou lixiviação. Além desses, podemos elencar as pesquisas envolvendo os mecanismos de disponibilização de fosfatos no solo; a busca de novas fontes de nutrientes provenientes de agrominerais nacionais; o uso de nanotecnologia e as novas ferramentas de fertilização para a agricultura de precisão.

No que se refere ao crescimento da produção e utilização de fontes alternativas, a utilização de rejeitos (de mineração ou minerais com menor teor de nutrientes) e fontes alternativas poderão ocupar parte dos mercados locais e, ou regionais, com competitividade, embora não necessariamente com a mesma eficiência. Os resíduos orgânicos de várias fontes, inclusive urbanos deverão receber maior atenção. A utilização dos resíduos de agroindústria, e de tratamento de dejetos urbanos e de criações animais será intensificada como fontes de nutrientes, associados ou não a fontes convencionais minerais – os chamados fertilizantes organominerais. Apenas a conversão dos nutrientes presentes nos resíduos provenientes dos segmentos que apresentam menores desafios logísticos (sucroalcooleiro, suíno e avicultor de corte) representaria um mercado potencial superior a 1 bilhão de dólares

anuais (Cruz et al., 2017). Considerando-se um aproveitamento para fertilização de 50% do total de resíduos produzidos por esses setores, acrescido da bovinocultura de corte em confinamento (estimado em 30% do rebanho nacional), calcula-se que o total de fertilizante NPK potencialmente aproveitável atinja mais de 11 milhões de toneladas¹. Para isso, será necessário o desenvolvimento de tecnologias que permitam a ciclagem de resíduos agrícolas e industriais de modo efetivo e econômico. A economia circular surge como um modelo organizado em sistemas de produção e consumo em circuitos fechados. O intuito é que os resíduos gerados possam ser reutilizados como insumos no processo produtivo.

Ainda neste sentido, há necessidade de investimentos em pesquisas visando o desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de formulações fertilizantes de eficiência aumentada, ou seja, com baixa geração de resíduos em sua produção e com baixa contaminação do ambiente, com custos compatíveis com a produção agrícola. Como exemplo, podemos citar o uso de nitrogenados de maior estabilidade do que a ureia para aumento da eficiência do N, envolvendo as tecnologias que promovem a liberação lenta do N presente na ureia (adição de inibidores de urease e/ou nitrificação) ou o revestimento dos grânulos com compostos que diminuam a sua solubilidade. O desafio será a redução do custo destes fertilizantes, pois o preço ainda é um fator limitante e o uso na agricultura comercial de grande escala dependerá de comprovações científicas de eficiência e eficácia na produtividade das diferentes culturas, além de políticas governamentais de incentivo vinculadas à questão ambiental. Como destacado por Chalk et al. (2015), em última instância, a escolha das formulações para uso nos diferentes sistemas agrícolas levará

em conta o valor da produção e o grau de vulnerabilidade ambiental do agroecossistema.

O desenvolvimento de condicionadores eficazes para o aumento da eficiência dos insumos utilizados na agricultura, com ênfase na linha biológica e formas de aplicação de nutrientes mais eficientes, em especial via foliar, utilizando a nanotecnologia, por exemplo, são desafios que estão sendo abordados pela pesquisa. Além disso, serão também impulsionadas opções de adição de nutrientes e/ou micronutrientes não em mistura de fertilizantes, mas sim na composição dos grânulos de fertilizantes. Novas formulações contendo boro, enxofre e fertilizante fosfatado com controle de liberação no solo; a adição de grafeno para aumento da dureza de grânulos, promovendo a liberação lenta de micronutrientes no solo, podendo agregar nas intercamadas do grafeno tanto ânions quanto cátions são novas tecnologias no radar para o futuro (Kabiri et al., 2017).

Outra tendência importante na agricultura refere-se ao crescente uso das tecnologias avançadas, como agricultura digital e sensores. A agricultura de precisão, certamente, não está limitada ao uso de tecnologias e equipamentos de ponta pelos produtores de países desenvolvidos. O maior desafio está justamente na quantificação e integração das variações espaço-temporais da produtividade das culturas, variáveis essas associadas ao solo e à planta, e condicionadas pelos mais diversos fatores determinantes do crescimento e desenvolvimento das culturas (Machado et al., 2004). A agricultura de precisão deverá impulsionar o uso de fertilizantes com melhores qualidades físicas e compostos multinutrientes. Neste sentido, a qualidade física dos fertilizantes deverá ser mais valorizada (vantagens operacionais claras). Os fertilizantes de alta

solubilidade e qualidade para fertirrigação, bem como a utilização de sensores para definição de formulações fertilizantes específicas para atendimento preciso da demanda em nível local, também devem ganhar mercado. A agricultura urbana e a produção de alimentos em condições controladas, sem solo, também impulsionarão esse mercado.

Um novo desafio que se apresenta é o aproveitamento do significativo reservatório de fósforo residual presente nos solos de Cerrado brasileiro onde houve, durante décadas, e ainda há, um grande investimento em fertilização. Pavinato et al. (2020) revisaram este tema com dados que oferecem um arsenal de oportunidades nesta área. Experimentos de longa duração indicam que 70% do fertilizante fosfatado aplicado nas culturas ficam retidos nos diferentes componentes da matriz do solo. Estimativas indicam que a fertilização e aplicação de resíduos agrícolas resultaram no acúmulo de cerca de 33,4 Tg de P residual (*P legacy*) nos solos brasileiros de 1967 a 2016. Essa quantidade de P armazenada na matriz do solo corresponde a aplicação de 20,8 bilhões de dólares em fertilizantes. Esse acúmulo de fósforo nas diferentes frações do solo, a seguir o mesmo ritmo de fertilização, poderá chegar a 106,5 Tg em 2050.

Considerando-se que, em 2020, 72% do fertilizante fosfatado utilizado na agricultura brasileira foi importado, o “pool” de fósforo presente nos solos é um grande patrimônio dos agricultores e oferece uma oportunidade para o avanço na adoção de soluções tecnológicas baseadas em microrganismos promotores de crescimento vegetal e solubilizadores de fosfato (Brasil, 2021). Por outro lado, o aproveitamento desta reserva de P nos solos é também um desafio para a agricultura conservacionista, uma vez

que, com práticas agrícolas adequadas para o manejo do solo, sistemas de cultivo diversificados, baseados essencialmente nos sistemas de plantio direto (Rodrigues et al., 2016), aliados ao uso de bioinsumos com microrganismos solubilizadores de P e novas formulações de fertilizantes fosfatados de liberação gradual, os agricultores podem maximizar o aproveitamento deste reservatório de P, reduzindo a necessidade de fertilização e promovendo a sustentabilidade da agricultura. Em função da alta dependência brasileira da importação de fertilizantes, o desenvolvimento de fontes alternativas pode amenizar essa situação e as alternativas biológicas deverão ser impulsionadas neste sentido.

A amônia verde, obtida a partir de fontes renováveis de energia (solar e eólica), apresenta potencial para redução de importação de nitrogenados. A redução dos custos das fontes renováveis de energia tem impulsionado essa via. De acordo com Kelman (2020), a produção local de fertilizantes nitrogenados seria apenas uma das possíveis aplicações da amônia verde, já que é também uma “forma conveniente de armazenar a energia do hidrogênio”.

Em termos de tecnologias, os nitrogenados especiais, os fosfatados de liberação gradual e os produtos orgânicos e biológicos representam aquilo que se espera de disruptivo no futuro dos fertilizantes no Brasil. Contudo, no caso de orgânicos, ressalta-se que frequentemente a evolução é incremental e não disruptiva, tendo avançado o reaproveitamento de resíduos na agricultura mesmo em cultivos de maior escala.

O uso de bioinsumos na agricultura é uma das tecnologias de destaque na agricultura conservacionista brasileira, sendo a inoculação das sementes de leguminosas com bactérias fixadoras

de nitrogênio a mais amplamente difundida, como ocorre na soja, exemplo de maior sucesso, onde o inoculante a base de rizóbio é usado em substituição ao adubo nitrogenado. A expectativa de crescimento deste mercado gira em torno de 25% ao ano, em contraste com 17% para o mercado mundial (Embrapa, 2020). Atento à necessidade de regulação e de incentivo a este mercado em franco desenvolvimento, o MAPA lançou o Programa Nacional de Bioinsumos que tem por objetivo “ampliar e fortalecer a utilização de bioinsumos para o desenvolvimento sustentável da agricultura brasileira” (Brasil, 2021a). Trata-se de um programa abrangente que envolve os múltiplos aspectos deste tema, e que pode resultar em investimentos na pesquisa e desenvolvimento de novos produtos e no fomento ao mercado dos inoculantes com microorganismos promotores de crescimento, condicionadores biológicos de solo - solubilizadores de nutrientes, especialmente o fósforo, organismos benéficos para a rizosfera das plantas - e biofertilizantes. O uso de bactérias fixadoras de nitrogênio e/ou promotoras de crescimento vegetal são potencialmente tecnologias de grande impacto e que já possuem indicação para aplicação em áreas de pastagem, cana de açúcar, arroz, milho e trigo, bem como a inoculantes contendo misturas destes microrganismos para leguminosas.

O potencial uso da rochagem, que consiste na aplicação de produtos conhecidos como “remineralizadores” - fontes silicáticas de nutrientes como o K, Mg e Ca - bem como o reaproveitamento de resíduos de mineradoras é um tema que deverá direcionar pesquisas para os estudos de nutrição de plantas. Especial atenção também deverá ser dada a elementos até o momento considerados não essenciais às plantas, mas que podem ser essenciais para microrganismos do solo que tem ação sobre o crescimento de plantas, tema ainda carente de investigação e que pode trazer uma

nova abordagem para a nutrição vegetal. Nesta temática, a posição oficial da Embrapa é de que no momento “não há informação científica suficiente para se recomendar agrominerais silicáticos (remineralizadores) como fonte de nutrientes, sobretudo, de potássio, ou condicionadores de solos para a agricultura”. Contudo, a Embrapa está se organizando de forma coletiva, multidisciplinar e institucional para fornecer posição científica sobre o uso de agrominerais silicáticos na agricultura brasileira, por meio da execução de um projeto em rede, que visa a validação agrônômica de produtos comerciais e potenciais remineralizadores de solos, segundo a legislação brasileira vigente. Estes estudos serão direcionados de forma clara e objetiva para fornecer evidência técnica que embase ou não a aplicabilidade desses materiais na agricultura.

As diversas tendências elencadas acima apontam para ameaças e oportunidades para a área. Uma ameaça importante refere-se às “falsas inovações” em que empresas comerciais promovem produtos sem eficiência comprovada por instituições idôneas, muitas vezes sem comprovação científica devido à ausência de avaliações realizadas em condições de campo ou mesmo sem apresentarem resultados positivos em relação às fontes convencionais de nutrientes. Os sistemas oficiais de regulação e fiscalização precisam ser aperfeiçoados de forma a garantir composição química e a qualidade dos fertilizantes, um importante desafio para o Plano Nacional de Fertilizantes em discussão no Ministério da Agricultura. Por outro lado, é importante que a pesquisa e os agentes de transferência de tecnologia estejam interconectados, fazendo com que os resultados das pesquisas e inovações cheguem na ponta, ou seja, aos agricultores.

Referências

ANUÁRIO ESTATÍSTICO DO SETOR DE FERTILIZANTES. São Paulo: Anda, n. 2019, 2020.

BERALDO, J. B. L.; FIGUEIREDO, M. G. de. Formação do preço de fertilizantes em Mato Grosso. **Revista de Política Agrícola**, ano 25, n. 3, p. 16-20, jul./set. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152612/1/Formacao-do-preco-de-fertilizantes.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2017/18 a 2027/28: projeções de longo prazo**. Brasília, DF: Mapa, 2018. 112 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/banner_site-03-03-1.png/@_@download/file/projecoes-do-agronegocio-2018.pdf. Acesso em: 1 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do agronegócio: Brasil 2019/20 a 2029/30: projeções de longo prazo**. Brasília, DF: Mapa, 2020. 101 p. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio_2019_20-a-2029_30.pdf/@_@download/file/PROJEC%CC%A7O%CC%81ES%20DO%20AGRONEGO%CC%81CIO_2019-20%20a%202029-30.pdf. Acesso em: 27 jun. 2021.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Programa Nacional de Bioinsumos. Brasília, DF: Mapa, 2021a. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/bioinsumos>. Acesso em: 1 fev. 2022.

BRASIL. **Siscomex**. Brasília, DF, 2021b. Disponível em: <http://www.siscomex.gov.br/>. Acesso em: 21 jun. 2021.

CHALK, P. M.; CRASWELL, E. T.; POLIDORO, J. C.; CHEN, D. Fate and efficiency of 15 N-labelled slow- and controlled-release fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 102, n. 2, p. 167-178, Jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10705-015-9697-2>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA AGRICULTURA (Brasil). **Sistema CNA/Senar apresenta resultados dos custos de produção no campo**. Brasília, DF: CNA, 2021. Disponível em: <https://www.cnabrasil.org.br/noticias/sistema-cna-senar-apresenta-resultados-dos-custos-de-producao-no-campo>. Acesso em: 20 set. 2021.

CRUZ, A. C.; PEREIRA, F. dos S.; FIGUEIREDO, V. S. de. Fertilizantes organominerais de resíduos do agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **BNDES Setorial**, n. 45, p. 137-187, mar. 2017. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/11814/1/BS%2045%20Fertilizantes%20organominerais%20de%20res%20c3%adduos%20%5b...%5d_P_BD.pdf. Acesso em: 7 dez. 2021.

FARIAS, P. I. V.; FREIRE, E; CUNHA, A. L. C. da; GRUMBACH, R. J. dos S.; ANTUNES, A. M. de S. The fertilizer industry in Brazil and the assurance of inputs for biofuels production: prospective scenarios after Covid-19. **Sustainability**, v. 12, n. 21, 8889, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12218889>.

GLOBALFERT. **Importação de fertilizantes bate recorde em 2020**. 2021. Disponível em: <https://globalfert.com.br/analises/importacao-de-fertilizantes-bate-recorde-em-2020/>. Acesso em: 12 jul. 2021.

HIJBEEK, R.; VAN LOON, M. P.; VAN ITTERSUM, M. K. **Fertiliser use and soil carbon sequestration**: opportunities and trade-offs. Wageningen: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security, 2019. (CCAFS Working paper, n. 264). Disponível em: <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/101190/WP%20264%20Hijbeek%20et%20al%202019.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

KABIRI, S.; DEGRYSE, F.; TRAN, D. N. H.; SILVA, R. C. da; MCLAUGHLIN, M. J.; LOSIC, D. Graphene oxide a new carrier for slow release of plant micronutrients. **ACS Applied Materials & Interfaces**, v. 9, n. 49, p. 3325-43335, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsami.7b07890>.

KELMAN, R. **Amônia verde**. 23 maio 2020. Disponível em: <https://editorabrasilenergia.com.br/amonia-verde/>. Acesso em: 5 maio 2021.

MACHADO, P. L. O. de A.; BERNARDI, A. C. de C.; SILVA, C. A. (ed.). **Agricultura de precisão para o manejo da fertilidade do solo em sistema plantio direto**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. 209 p. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/175687/1/Agricultura-de-precisao-para-o-manejo-da-fertilidade-do-solo-em-sistema-plantio-direto-2004.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

MARIN, F. R.; PILAU, F. G.; SPOLADOR, H. F. S.; OTTO, R.; PEDREIRA, C. G. S. Intensificação sustentável da agricultura brasileira Cenários para 2050. **Revista de Política Agrícola**, ano 25, n. 3, p. 108-124, jul./set. 2016. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/152627/1/Intensificacao-sustentavel-da-agricultura-brasileira.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

PAVINATO, P. S.; CHERUBIN, M. R.; SOLTANGHEISI, A.; ROCHA, G. C.; CHADWICK, D. R.; JONES, D. L. Revealing soil legacy phosphorus to promote sustainable agriculture in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, 15615, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72302-1>.

TEIXEIRA, P. C.; STRALIOTTO, R.; BENITES, V. M.; ALMEIDA, E. C.; CAMPOS, D. V. B.; TORRES, L. A.; CAMPOS, S. K.; NAKAYAMA, M. A. **Observatório Solos**: novos insumos, fertilizantes e condicionadores para solos tropicais. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2019. 27 p. Relatório institucional.

Nota

¹ Plano Nacional de Fertilizantes, dados não publicados.

Capítulo 7. Serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis

Elaine Cristina Cardoso Fidalgo, Azeneth Eufrausino Schuler, Ana Paula Dias Turetta, Bernadete da Conceição Carvalho Gomes Pereira, Fabiane Machado Vezzani, Helga Restum Hissa, Joice Nunes Ferreira, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Junior Ruiz Garcia, Marcio Mattos de Mendonça, Mariella Camardelli Uzêda, Silvia Marie Ikemoto, Mônica Matoso Campanha e Rachel Bardy Prado

Serviços ecossistêmicos (SE) são benefícios advindos de processos naturais dos ecossistemas, que por meio de funções ecossistêmicas geram, direta ou indiretamente, bens e serviços que beneficiam a sociedade humana. Compreendem, ainda, aspectos de caráter subjetivo relacionados ao bem-estar psicológico e espiritual (Ferraz et al., 2019).

Desde o lançamento do relatório do Millennium Ecosystem Assessment (2005), os serviços ecossistêmicos vêm ganhando popularidade e aplicações em diversos contextos, mas também trazem desafios que requerem pesquisa, envolvimento da sociedade e políticas públicas.

Serviços ecossistêmicos em paisagens multifuncionais

Dados da Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecosistêmicos (Joly et al., 2018) citam que de 141 culturas agrícolas analisadas no país, 85 dependem da polinização por animais. Cerca de 80 famílias e 469 espécies de plantas são cultivadas em sistemas agroflorestais. Mais de 245 espécies da flora brasileira são base de produtos cosméticos e farmacêuticos e ao menos 36 espécies botânicas nativas possuem registro de fitoterápicos. Mais de 40% da produção de energia primária no país é proveniente de fontes renováveis, assim como 2/3 da energia elétrica consumida provém de usinas hidrelétricas que dependem da integridade de ecossistemas, especialmente os florestais, para continuar funcionando.

Essa oferta de múltiplos SE resulta da diversidade de funções dos ecossistemas na paisagem. Uma paisagem multifuncional, portanto, é aquela que abriga ecossistemas com diferentes funções, no espaço e no tempo, e garante o fornecimento dos SE através da biodiversidade existente (Stürck; Verburg, 2017). Nela, os elementos sociais, econômicos e culturais estão conectados aos elementos naturais. Paisagens agrícolas multifuncionais permitem o uso integrado do espaço, favorecem a biodiversidade ao proporcionar múltiplas interações ecológicas (Perfecto; Vandermeer, 2008), e assim, otimizam os SE, em contraponto às paisagens homogêneas, típicas da agricultura baseada em monocultivos. Um dos elementos chaves nessas interações ecológicas é o solo, e sua saúde é fundamental para a provisão de SE.

Multifuncionalidade e saúde do solo

Saúde do Solo é “a capacidade contínua de um solo funcionar como um ecossistema vivo essencial que sustenta plantas, animais e humanos” (Estados Unidos, 2020, tradução nossa).

A condição dinâmica de um sistema vivo, que acarreta a continuidade da sua existência e funcionamento, se dá nas múltiplas relações entre seus componentes e destes com o ambiente ao redor. Por isso, um solo saudável é aquele que faz parte de um ecossistema biodiverso, complexo, com riqueza de componentes de forma que proporcione uma abundância de relações, pois estas é que geram os processos ecológicos (Cardinale et al., 2012) os quais promovem a funcionalidade do solo. As funções do solo que resultam desses processos proveem serviços ecossistêmicos (European Commission, 2006; Bünemann et al., 2018).



Figura 1. Multifuncionalidade e saúde dos serviços ecossistêmicos dos solos e aplicação.

Fotos: Istock©. Foto 1: Andreusk; Foto 2: Romolo Tavani; Foto 3: Murilo Gualda; Foto 4: Rawpixel.

Na paisagem rural, sistemas que produzem diversos produtos ao mesmo tempo em um mesmo espaço constroem condições para o solo exercer suas múltiplas funções pela riqueza de elementos bióticos e padrões abióticos e abundância de relações. Ecossistemas biodiversos, tanto naturais como manejados, proporcionam solo saudável, e, assim, oferecem aos humanos os serviços ecossistêmicos. Atualmente, a pesquisa tem se voltado a estabelecer metodologias de análise para avaliar o funcionamento do solo *in situ*, pois os procedimentos de coleta rompem as relações responsáveis pelo funcionamento do solo e descaracterizam seus processos.

Investigam-se também métodos acessíveis e de custo baixo e o estabelecimento de padrões para classificação do funcionamento do sistema solo nos diferentes ecossistemas.

Cenários sociodiversos na provisão dos serviços ecossistêmicos

Como detentor de megabiodiversidade e capital natural, o Brasil conta com inúmeros ativos, como o elevado potencial para estocar carbono nos solos e nas florestas, água limpa, recursos genéticos, madeireiros e alimentares. Em todas as regiões do país, encontramos não apenas uma rica biodiversidade, mas também, uma vasta sociodiversidade a ela associada.

As comunidades tradicionais, compostas por povos indígenas, ribeirinhos, quilombolas, caiçaras, pescadores artesanais e diversas outras populações, há milhares de anos acumulam conhecimentos sobre o uso e manejo dos recursos naturais para a extração de produtos, a agricultura, a criação de animais, a pesca, e a coleta de espécies medicinais, dentre outras atividades. Esses conhecimentos e práticas são transmitidos de geração a geração e contribuem para a manutenção da paisagem multifuncional, da biodiversidade e dos SE, contribuindo para a segurança alimentar e nutricional (SAN), desenvolvimento local sustentável, preservação do ambiente e das culturas. Nesse contexto, tem se intensificado a produção de conhecimento científico aliado ao das populações indígenas e comunidades locais, conforme preconizado pelo IPBES, o Painel Internacional de Biodiversidade e SE (Pascual et al., 2017).

O reconhecimento do valor da diversidade cultural para a manutenção dos sistemas sociobiodiversos pode ser potencializado por iniciativas como os mercados verdes (que envolvem produção e consumo sustentáveis) e modalidades de turismo sustentável, dentre eles o agroturismo. O agroturismo desempenha um importante papel no fornecimento de SE na paisagem rural multifuncional ao contribuir para a conservação ambiental, incentivar a produção sob boas práticas agropecuárias e, ao mesmo tempo, valorizar o patrimônio imaterial, histórico e cultural (Grass et al., 2019). Os empreendimentos do agroturismo estabelecem redes de aproximação entre produtor-consumidor, que geram novos nichos econômicos, oportunidades de acesso dos pequenos produtores aos mercados (Schneider; Ferrari, 2015) e a criação de alternativas de geração de renda e emprego.

Tendo em vista a necessidade de produzir alimentos, empregos e renda e, ao mesmo tempo, manter os ecossistemas saudáveis e proporcionar qualidade de vida, considerando a diversidade de culturas, a FAO tem investido em programas para garantir a SAN das populações e os SE, mediante o estabelecimento de sistemas alimentares sustentáveis, inclusivos e resilientes. A Agenda Urbana da Alimentação (FAO, 2019) preconiza o planejamento rural e urbano integrado, promovendo a multifuncionalidade da paisagem também em áreas urbanas como uma das estratégias para a formação destes sistemas alimentares. Nessa paisagem canteiros e jardins comestíveis se agregam à arborização e arquiteturas urbanas. Em 2020, a FAO lança novo programa, Green Cities Initiative, com o objetivo de melhorar o bem-estar das pessoas por meio de crescente disponibilidade e acesso a produtos e serviços provenientes de espaços verdes que incluem florestas e agricultura

urbanas e peri-urbanas e sistemas alimentares sustentáveis. O alvo é beneficiar 1.000 cidades no mundo até 2030 (FAO, 2020).

A agricultura urbana e peri-urbana (AUP) contempla produções, processamentos, distribuição e demais atividades agropecuárias realizadas no âmbito dos lugares urbanos e imediações. A prática acessa recursos urbanos – como espaço físico e mão de obra - e, não raro, direciona sua produção para os habitantes das cidades, atuando de forma integrada aos sistemas econômico-ecológicos desses territórios (Ferreira, 2020). Assim, a AUP amplia o espectro de SE na paisagem como resultado de sua diversificação e “esverdeamento”, da manutenção de maiores superfícies para a infiltração de água, da produção de alimentos, além de permitir o envolvimento de moradores das cidades em atividades produtivas, cumprindo assim papéis diversos, como a ocupação de tempo e a terapêutica implícita na relação entre seres humanos e a natureza, e ampliação de acesso à educação ambiental.

Entre as estratégias de planejamento integrado urbano e rural que buscam garantir qualidade de vida e oferta de múltiplos SE aos habitantes das cidades, ganha destaque o desenvolvimento de Soluções baseadas na Natureza (SbN).

Soluções baseadas na Natureza

Segundo a União Internacional para a Conservação da Natureza (International Union for Conservation of Nature, IUCN), Soluções baseadas na Natureza (SbN) constituem (Figura 2):

[...] ações para proteger, usar e manejar de forma sustentável e restaurar ecossistemas naturais ou modificados, para atender aos desafios da sociedade de forma eficaz e adaptativa, proporcionando simultaneamente bem-estar humano e benefícios à biodiversidade. (Cohen-Shacham et al., 2016, p. xii, tradução nossa).



Figura 2. Abordagens de soluções baseadas na natureza para responder a desafios da sociedade.

Fonte: International Union for Conservation of Nature (2020).

As SbN (infraestrutura verde, adaptação baseada em ecossistemas, gestão integrada de recursos hídricos etc.) devem ter:

[...] boa relação custo-benefício, proporcionar simultaneamente benefícios ambientais, sociais e econômicos e ajudar a criar resiliência. [...], por meio de intervenções sistêmicas, eficientes em termos de recursos e adaptadas localmente. (European Commission, 2020, tradução nossa).

A atenção às SbN está aumentando, e nesse contexto, a agricultura destaca-se como um setor com grande potencial de transformação devido ao uso intensivo de água, à relação entre água e segurança alimentar, ao potencial para a redução da pobreza e às amplas oportunidades para implantação de SbN (United Nations World Water Assessment Programme, 2018).

Dentre as barreiras para adoção de SbN, cabe ressaltar as incertezas em torno do desempenho e custo-efetividade dos seus benefícios e co-benefícios, e a falta de diretrizes e orientações para planejar, projetar, implementar, monitorar e avaliar as SbN adaptadas às condições locais (Sarabi et al., 2020). Como soluções multifuncionais, as SbN requerem cooperação entre diversas instituições, disciplinas e partes interessadas, que muitas vezes têm diferentes perspectivas e prioridades (Frantzeskaki et al., 2017; Nesshöver et al., 2017).

Apesar do potencial das SbN para promover o bem-estar da sociedade, poucas pesquisas têm considerado como essas funcionam na prática, e estudos adicionais podem contribuir para o seu aperfeiçoamento (McDonald;

Shemie, 2014; Bremer et al., 2016). O monitoramento dos impactos das SbN em diferentes escalas e dimensões espaciais e temporais, e o estabelecimento de uma estrutura comum e sistêmica para a avaliação dos impactos das SbN constituem direcionamentos importantes para pesquisas futuras (Somarakis et al., 2019). É também necessário promover programas educacionais e de treinamento para suprir deficiências de conhecimento e fortalecer capacidades em SbN (Davies; Laforteza, 2019).

Serviços ecossistêmicos e o papel dos mercados sustentáveis

O crescimento da atenção da sociedade para questões ambientais, sociais, de saúde e estética vem dando sinais de mudanças no padrão de consumo, inclusive o de produtos agrícolas. A perspectiva de crescimento do consumo sustentável e consciente exige mudanças nas relações de mercado. Nesse contexto, a expansão de diferentes modalidades de mercados verdes deve valorizar a multifuncionalidade da paisagem rural, permitindo aliar geração de renda à proteção da biodiversidade.

A demanda pela produção de alimentos saudáveis integrada à conservação da água, dos solos, das florestas, da agrobiodiversidade e aos saberes tradicionais e valores culturais, tem apontado diretrizes para a reconfiguração das relações de mercado. Esta configuração requer não apenas melhorias da infraestrutura produtiva e ambiental, mas também mecanismos de

rastreabilidade de produtos capazes de aproximar produtores e consumidores e os espaços rural e urbano. A comunicação dos benefícios associados a tais produtos viabiliza relações mais horizontais e duradouras entre setores produtivos, governos e populações, contribuindo para a governança de sistemas agroalimentares sustentáveis e paisagens resilientes.

Os impactos da adoção de práticas e políticas voltadas à sustentabilidade no Brasil foram objeto de estudo realizado por World Resources Institute Brasil e New Climate Economy. Os resultados indicam que, com a adoção dessas, o crescimento do PIB (base 2020) pode alcançar um ganho total acumulado de R\$ 2,8 trilhões até 2030, além de gerar empregos, restaurar pastagens degradadas, reduzir emissões de gases de efeito estufa e aumentar a produtividade agrícola no país (Barros et al., 2020).

Um exemplo de iniciativa em crescimento no Brasil e na América Latina é o pagamento por serviços ambientais (PSA), que utiliza instrumentos econômicos para incentivar a manutenção de SE mediante práticas sustentáveis e de recuperação de ecossistemas por meio de relações que envolvem produtores e beneficiários do SE.

O uso de instrumentos econômicos para a proteção ambiental é previsto na legislação brasileira. A Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/1981) preconiza o uso de instrumentos econômicos (Brasil, 2018); e o Novo Código Florestal (Lei 12.651/2012), o pagamento ou incentivo a serviços ambientais (Brasil, 2012). Recentemente, em janeiro de 2021, foi aprovada a Lei 14.119, que institui a Política Nacional e o Programa Federal de

Pagamento por Serviços Ambientais¹ (Brasil, 2021). Porém, sua aplicação dependerá ainda de regulamentação.

A busca por sustentabilidade num mercado em transformação tem levado empresas a melhores condutas ambientais, sociais e de governança (ESG- Environmental, Social & Governance). Muitos investidores, além de verificar a saúde financeira da empresa, têm buscado informações sobre sua responsabilidade com o meio ambiente e a sustentabilidade nas suas operações; sobre os aspectos sociais no relacionamento com colaboradores, fornecedores, clientes e toda a comunidade; e aspectos da governança, como a manutenção de melhores processos de administração com ética e transparência. Nesse contexto, os títulos verdes, que são títulos de dívidas para financiar projetos com impacto ambiental, estão trazendo oportunidades para a conservação ambiental e de negócios para empresas comprometidas com esses temas. Em 2019 eles atingiram 258,9 bilhões de dólares no mundo, o que representa 50% a mais que 2018, o melhor ano da série histórica iniciada em 2007. No Brasil, foram 896 milhões de dólares em 2019, o que representou 13% a mais que 2010 (Almeida, 2020).

Avaliação dos serviços ecossistêmicos para apoiar a tomada de decisão

A melhor compreensão da contribuição dos ecossistemas à sociedade demanda metodologias e medidas claras dos SE para informar seus benefícios, orientar mercados e tomar decisões acerca da gestão sustentável de paisagens.

Inúmeros estudos têm buscado criar parâmetros para planejamento e gestão de paisagens multifuncionais de forma sustentável (Queiroz et al., 2015; Yang et al., 2015). Para isso, identificar e quantificar as funções da paisagem e os SE sob condições naturais e sociais específicas, assim como os conflitos (trade-offs) e sinergias entre eles, têm se mostrado desafios importantes (Peng et al., 2019).

A avaliação de SE requer tanto medidas biofísicas dos ecossistemas capazes de refletir mudanças em sua estrutura e função conduzidas por decisões de gestão e/ou por mudanças ambientais, por exemplo, as mudanças do clima; como medidas sociais e econômicas que demonstrem o impacto dos SE no bem-estar humano (Olander et al., 2018).

Esforços têm sido realizados para a validação de métodos capazes de mensurar os SE de maneira simples, prática e com baixo custo, de forma que sua aplicação e a avaliação dos resultados possam ser realizadas por um público mais amplo, sem depender de técnicos especializados. A avaliação integrada dos SE a partir de um conjunto mínimo de indicadores tem contribuído no suporte à tomada de decisão por atores locais, gestores públicos e a sociedade em geral (Barrios et al., 2011; Ferreira et al., 2012; Ralisch et al., 2017).

As avaliações podem empregar indicadores não monetários, incluindo a percepção das pessoas sobre a importância dos diferentes serviços (Martín-López et al., 2014), técnicas de avaliação econômica em mercados reais ou hipotéticos (Turner et al., 2010) ou modelos simuladores das interações entre ecossistemas e sociedade.

A valoração de SE é um dos métodos de avaliação que tem contribuído para auxiliar a tomada de decisão da sociedade, subsidiando, por exemplo, decisões de investimentos, produção e consumo, judiciais e o delineamento de políticas públicas. O objetivo da valoração é revelar a importância ecológica, social e econômica dos SE para a sociedade. Uma vez que os SE podem ter múltiplos valores, por exemplo, ecológicos, socioculturais e econômicos, a revelação de cada valor exige a adoção de métodos específicos de diversas áreas de conhecimento. Isso implica que, não necessariamente, o resultado da valoração seja um valor monetário, mas possa ser apresentado como métrica biofísica, por exemplo, em toneladas de carbono capturado, em metros cúbicos de água ou em toneladas de erosão do solo evitada. A adoção de métodos de valoração baseados em modelos multidimensionais que consideram a dinâmica espaço-temporal tem crescido.

Modelos para avaliação ou valoração de SE envolvem a representação de sistemas socioecológicos (SSE) e exigem ferramentas capazes de traduzir sua complexidade. A escolha de um modelo depende do objetivo da aplicação. São frequentes as aplicações com a finalidade de obter melhores decisões de governança, seja para planejamento territorial, gestão de recursos ou avaliação de efeitos de políticas públicas (Ávila-Foucat; Galeana, 2020). Aplicações para fins educativos também crescem com o uso de ferramentas interativas na forma de games que simulam os efeitos das decisões humanas sobre a paisagem e os SE. Cabe destacar que reconhecer as limitações de cada modelo é fundamental, evitando a geração de informações equivocadas ou falsas devido à falta de compreensão adequada dos resultados de uma simulação.

Considerações Finais

Os desafios para a proteção, manutenção e restauração dos múltiplos SE em benefício dos diferentes modos de vida demandam soluções que passam por respostas originais da sociedade, envolvendo não apenas o conhecimento multidisciplinar, mas também transdisciplinar, em que múltiplas formas de conhecimento e cultura dialogam entre si. Essas soluções devem ser fundamentadas na busca por equidade, sustentabilidade e resiliência dos sistemas socioecológicos, considerando a interdependência entre eles. A pesquisa tem contribuído em diferentes linhas de atuação para a construção destas soluções, por meio de:

- Análise e avaliação integrada de estruturas, funções, processos e serviços ecossistêmicos, de conflitos e sinergias na provisão dos diferentes serviços, e dos impactos decorrentes de forçantes antrópicas e ambientais;
- Avaliação, valoração e simulação dos SE em diferentes escalas e contextos sociais e ambientais, incluindo métodos de baixo custo;
- Abordagens transdisciplinares, holísticas e participativas para o diálogo de conhecimentos e valorização da sociodiversidade, em especial seu papel na provisão dos SE e na SAN;
- Soluções de uso e manejo sustentável do solo, da água e da biodiversidade em distintos contextos socioecológicos;
- Estratégias e ferramentas para o planejamento de paisagens multifuncionais rurais e urbanas, considerando ainda seu papel para a SAN;

- Ferramentas para o fortalecimento de sistemas alimentares sustentáveis e mercados justos; e
- Ferramentas para fins educacionais, de comunicação e apoio à decisão em diversos níveis, desde produtores e comunidades locais até o delineamento de políticas públicas.

Referências

ALMEIDA, M. **Green bonds global state of the market 2019**. London: Climate Bonds Initiative, 2020. Disponível em: https://www.climatebonds.net/files/reports/cbi_sotm_2019_vol1_04d.pdf. Acesso em: 9 fev. 2021.

ÁVILA-FOUCAT, S.; GALEANA, M. (coord.). Modelación de sistemas socioecológicos. In: ESP-LAC CONFERENCIA REGIONAL, 2020, México, DF. **Resúmenes**. México, DF, 2020. Sesión temática 11A. Disponível em: <https://www.eslatinamerica2020.org/Resumenes/SESIONES TEMÁTICAS/Sesión temática 11A.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

BARRIOS, E.; COUTINHO, H. L. da C.; MEDEIROS, C. A. B. **InPaC-S: Integração participativa de conhecimentos sobre indicadores de qualidade de solo: guia metodológico**. Nairobi: World Agroforestry Centre: Embrapa: CIAT, 2011. 178 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/66631/1/InPaC-S-Barrios-et-al-2011.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

BARROS, A. C.; BASSI, A.; LUCENA, A. F. P.; ANDRADE, A. L.; SZKLO, A.; PINHEIRO, B.; CUNHA, B.; GENIN, C.; SILVA, F. da; ANGELKORTE, G.; FERES, J.; GARRIDO, L.; FELTRAN-BARBIERI, R.; GARAFFA, R.; STUDART, R.; SCHAEFFER, R.; KENEALLY, S.; ROMEIRO, V. **Uma nova economia para uma nova era: elementos para a construção de uma economia mais eficiente e resiliente para o Brasil**. São Paulo: WRI Brasil; Washington, DC: New Climate Economy, 2020. Disponível em: https://wribrasil.org.br/sites/default/files/af_neb_synthesisreport_digital.pdf. Acesso em: 13 dez. 2020.

BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nºs 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de

agosto de 2001; e dá outras providências. Brasília, DF, 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 7 fev. 2022.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e altera as Leis nos 8.212, de 24 de julho de 1991, 8.629, de 25 de fevereiro de 1993, e 6.015, de 31 de dezembro de 1973, para adequá-las à nova política. Brasília, DF, 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14119.htm. Acesso em: 7 fev. 2022.

BREMER, L. L.; AUERBACH, D. A.; GOLDSTEIN, J. H.; VOGL, A. L.; SHEMIE, D.; KROEGER, T.; NELSON, J. L.; BENÍTEZ, S.P.; CALVACHE, A.; GUIMARÃES, J.; HERRON, C.; HIGGINS, J.; KLEMPZ, C.; LEÓN, J.; SEBASTIÁN LOZANO, J.; MORENO, P. H.; NUÑEZ, F.; VEIGA, F.; TIEPOLO, G. One size does not fit all: natural infrastructure investments within the Latin American Water Funds Partnership. **Ecosystem Services**, v. 17, p. 217-236, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2015.12.006>.

BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MÄDERA, P.; PULLEMAN, M.; SUKKELF, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSAARD, L. Soil quality: a critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>.

CARDINALE, B. J.; DUFFY, J. E.; GONZALEZ, A.; HOOPER, D. U.; PERRINGS, C.; VENAIL, P.; NARWANI, A.; MACE, G. M.; TILMAN, D.; WARDLE, D. A.; KINZIG, A. P.; DAILY, G. C.; LOREAU, M.; GRACE, J. B.; LARIGAUDERIE, A.; SRIVASTAVA, D. S.; NAEEM, S. Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v. 486, p. 59-67, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature11148>.

COHEN-SHACHAM, E.; WALTERS, G.; JANZEN, C.; MAGINNIS, S. (ed.). **Nature-based solutions to address global societal challenges**. Gland: IUCN, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>.

DAVIES, C.; LAFORTEZZA, R. Transitional path to the adoption of nature-based solutions. **Land Use Policy**, v. 80, p. 406-409, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.020>.

EUROPEAN COMMISSION. **Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: thematic strategy for soil protection**. Brussels, 2006. COM(2006)231 final. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0231:FIN:EN:PDF>. Acesso em: 1 fev. 2022.

EUROPEAN COMMISSION. **Nature-based solutions**. Brussels, 2020. Disponível em: https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en. Acesso em: 17 dez. 2020.

ESTADOS UNIDOS. Natural Resources Conservation Service. **Soil health**. 2020. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/health/?cid=nrcs142p2_053846. Acesso em: 17 dez. 2020.

FAO. **FAO framework for the urban food agenda**. Rome, 2019. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca3151en/CA3151EN.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

FAO. **FAO green cities initiative: green cities action programme: building back better**. Rome, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/3/cb0848en/cb0848en.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2021.

FERRAZ, R. P. D.; PRADO, R. B.; PARRON, L. M.; CAMPANHA, M. M. (ed.). **Marco referencial em serviços ecossistêmicos**. Brasília, DF: Embrapa, 2019. 121 p. E-book. Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/205733/1/Marco-Referencial-em-Servicos-Ecossistemas-2019.pdf>. Acesso em: 10 dez 2020.

FERREIRA, J. da L. (coord.). **Mais perto do que se imagina: os desafios da produção de alimentos na metrópole de São Paulo**. São Paulo: Instituto Escolhas, 2020. Disponível em: <https://www.escolhas.org/wp-content/uploads/2020/11/Sum%C3%A1rio-Executivo-Mais-perto-do-que-se-imagina-a-produ%C3%A7%C3%A3o-de-alimentos-na-metr%C3%B3pole-de-S%C3%A3o-Paulo.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2020.

FERREIRA, J. M. L.; VIANA, J. H. M.; COSTA, A. M. da; SOUSA, D. V. de; FONTES, A. A. Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas. **Informe Agropecuário**, v. 33, n. 271, p. 12-25, nov./dez. 2012.

FRANTZESKAKI, N.; BORGSTRÖM, S.; GORISSEN, L.; EGERMANN, M.; EHNERT, F. Nature-based solutions accelerating urban sustainability transitions in cities: lessons from Dresden, Genk and Stockholm cities. In: KABISCH, N.; KORN, H.; STADLER, J.; BONN, A. (ed.). **Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas**. Cham: Springer, 2017. p. 65-88. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_1.

GRASS, I.; LOOS, J.; BAENSCH, S.; BATÁRY, P.; LIBRÁN-EMBED, F.; FICICIYAN, A.; KLAUS, F.; RIECHERS, M.; ROSA, J.; TIEDE, J.; UDY, K.; WESTPHAL, C.; WURZ, A.; TSCHARNTKE, T. Land-sharing/-sparing connectivity landscapes for ecosystem services and biodiversity conservation. **People and Nature**, v. 1, n. 2, p. 262- 272, Jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/pan3.21>.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE. Ensuring effective Nature-based Solutions. **IUCN Issues Brief**, Jul. 2020. Disponível em: <https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/ensuring-effective-nature-based-solutions>. Acesso em: 10 mar. 2022.

JOLY, C. A.; SCARANO, F. R.; BUSTAMANTE, M.; GADDA, T.; METZGER, J. P.; SEIXAS, C. S.; OMETTO, J.-P.; PIRES, A. P. F.; BOESING, A. L.; SOUSA, F. D. R.; QUINTÃO, J. M.; GONÇALVES, L.; Padgurschi, M.; AQUINO, M. F. S. de; CASTRO, P. D. de; SANTOS, I. de L. **Sumário para tomadores de decisão: 1º diagnóstico brasileiro de biodiversidade e serviços ecossistêmicos**. Campinas: BPBES, 2018. 24 p. Disponível em:

<https://www.bpb.es.net.br/wp-content/uploads/2018/11/Sum%C3%A1rio-para-Tomadores-de-Decis%C3%A3o-BPBES-1.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

MARTÍN-LÓPEZ, B.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GARCÍA-LLORENTE, M.; MONTES, C. Trade-offs across value domains in ecosystem services assessment. **Ecological Indicators**, v. 37, pt. A, p. 220-228, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.03.003>.

MCDONALD, R. I.; SHEMIE, D. **Urban water blueprint**: mapping conservation solutions to the global water challenge. Washington, DC: The Nature Conservancy, 2014. Disponível em: https://www.nature.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/Urban_Water_Blueprint.pdf. Acesso em: 1 fev. 2022.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being**: synthesis. Washington, DC: Island Press, 2005. Disponível em: <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2020.

NESSHÖVER, C.; ASSMUTH, T.; IRVINE, K. N.; RUSCH, G. M.; WAYLEN, K. A.; DELBAERE, B.; Haase, D.; Jones-Walters, L.; Keune, H.; Kovacs, E.; Krauze, K.; Külvik, M.; Rey, F.; van Dijk, J.; Vistad, O. I.; Wilkinson, M. E.; Wittmer, H. The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective. **Science of the Total Environment**, 579, p. 1215-1227, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.106>.

OLANDER, L. P.; JOHNSTON, R. J.; TALLIS, H.; KAGAN, J.; MAGUIRE, L. A.; POLASKY, S.; URBAN, D.; BOYD, J.; WAINGER, L.; PALMER, M. Benefit relevant indicators: Ecosystem services measures that link ecological and social outcomes. **Ecological Indicators**, v. 85, p. 1262-1272, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.001>.

PASCUAL, U.; BALVANERA, P.; DÍAZ, S.; PATAKI, G.; ROTH, E.; STENSEKE, M.; WATSON, R. T.; DESSANE, E. B.; ISLAR, M.; KELEMEN, E.; MARIS, V.; QUAAS, M.; SUBRAMANIAN, S. M.; WITTMER, H.; ADLAN, A.; AHN, S.; AL-HAFEDH, Y. S.; AMANKWAH, E.; ASAH, S. T.; BERRY, P.; BILGIN, A.; BRESLOW, S. J.; BULLOCK, C.; CÁCERES, D.; DALY-HASSEN, H.; FIGUEROA, E.; GOLDEN, C. D.; GÓMEZ-BAGGETHUN, E.; GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, D.; HOUDET, J.; KEUNE, H.; KUMAR, R.; MA, K.; MAY, P. H.; MEAD, M.; O'FARRELL, P.; PANDIT, R.; PENGUE, W.; PICHIS-MADRUGA, R.; POPA, F.; PRESTON, S.; PACHECO-BALANZA, D.; SAARIKOSKI, H.; STRASSBURG, B. B.; VAN DEN BELT, M.; VERMA, M.; WICKSON, F.; YAGI, N. Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 26/27, p. 7-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>.

PENG, J.; HU, X.; QIU, S.; HU, Y.; MEERSMANS, J.; LIU, Y. Multifunctional landscapes identification and associated development zoning in mountainous area. **Science of The Total Environment**, v. 660, p. 765-775, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.023>.

PERFECTO, I.; VANDERMEER, J. Spatial pattern and ecological process in the coffee agroforestry system. **Ecology**, v. 89, n. 4, p. 915-920, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1890/06-2121.1>.

QUEIROZ, C.; MEACHAM, M.; RICHTER, K.; NORSTRÖM, A. V.; ANDERSSON, E.; NORBERG, J.; PETERSON, G. Mapping bundles of ecosystem services reveals distinct types of multifunctionality within a Swedish landscape. **Ambio**, v. 44, n. 1, p. 89-101, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0601-0>.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160858/1/Doc-390-OL.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

SARABI, S.; HAN, Q.; ROMME, A. G. L.; DE VRIES, B.; VALKENBURG, R.; DEN OUDEN, E. Uptake and implementation of Nature-Based Solutions: an analysis of barriers using Interpretive Structural Modeling. **Journal of Environmental Management**, v. 270, 110749, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110749>.

SCHNEIDER, S.; FERRARI, D. L. Cadeias curtas, cooperação e produtos de qualidade na agricultura familiar: o processo de realocação da produção agroalimentar em Santa Catarina. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, v. 17, n. 1, p. 56-71, 2015. Disponível em: <http://revista.dae.ufla.br/index.php/ora/article/view/949>. Acesso em: 1 fev. 2022.

SOMARAKIS, G.; STAGAKIS, S.; CHRYSOULAKIS, N. (ed.). **ThinkNature nature-based solutions handbook**. ThinkNature project funded by the EU Horizon 2020 research and innovation programme. 2019. DOI: <https://doi.org/10.26225/JERV-W202>.

STÜRCK, J.; VERBURG, P. H. Multifunctionality at what scale? A landscape multifunctionality assessment for the European Union under conditions of land use change. **Landscape Ecology**, v. 32, p. 481-500, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-016-0459-6>.

TURNER, R. K.; MORSE-JONES, S.; FISHER, B. Ecosystem valuation: a sequential decision support system and quality assessment issues. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1185, n. 1, p. 79-101, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05280.x>.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations world water development report 2018: nature-based solutions for water**. Paris: Unesco, 2018. 138 p. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002614/261424e.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

YANG, G.; GE, Y.; XUE, H.; YANG, W.; SHI, Y.; PENG, C.; DU, Y.; FAN, X.; REN, Y.; CHANG, J. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes. **Landscape and Urban Planning**, v. 136, p. 110-121, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.12.006>.

Nota

¹ Estabelece dentre seus objetivos estimular a pesquisa científica relativa à valoração dos SE e ao desenvolvimento de metodologias de execução, de monitoramento, de verificação e de certificação de projetos de PSA. Dentre as diretrizes destacam-se o reconhecimento de que os SE contribuem para a qualidade de vida da população e a utilização do PSA como instrumento de promoção do desenvolvimento social, ambiental, econômico e cultural das populações em área rural e urbana e dos produtores rurais, em especial das comunidades tradicionais, dos povos indígenas e dos agricultores familiares.

Capítulo 8. A saúde do solo

Lívia Abreu Torres, Rachel Bardy Prado, Daniel Vidal Perez, Wenceslau Geraldtes Teixeira, Paulo de Camargo Duarte, Ana Paula Dias Turetta, Guilherme Salgado, Alba Leonor da Silva Martins e Luis Carlos Hernani

A Saúde do Solo representa uma nova percepção envolvendo a Ciência do Solo, tradicionalmente, focada no uso da terra e, por conseguinte, no Nexus Alimentos-Fibras-Energia. Ela percebe a importância do solo como um sistema vivo e vital cujo uso e manejo deve ser gerenciado levando-se em conta a sua longevidade e sustentabilidade, tanto para as necessidades agrícolas, quanto as ambientais. Ou seja, ela considera o Solo como um patrimônio natural, biológico, histórico e cultural, sendo recurso estratégico para o enfrentamento da mudança do clima, como provedor de bem-estar rural e urbano, lar da maior biodiversidade de espécies, base para futuros medicamentos, fonte de lazer e até mesmo de arte.

Essa ampla abordagem evidencia e valoriza o solo sob novos olhares e convida diferentes atores a inserirem esse recurso em um contexto mais amplo, possibilitando enriquecer a ciência, ampliar a fronteira do conhecimento e melhor responder às complexidades e incertezas que surgirão.

Solos além da Agricultura

A origem do homem na Terra, segundo vários mitos, sempre esteve relacionada aos recursos naturais fundamentais para a

sobrevivência humana. Tales de Mileto, por exemplo, considerava a água o primórdio do Universo. No entanto, boa parte das religiões coloca o barro, a argila ou o pó da terra, que em última essência representam o solo, como a origem do Homem.

É o solo sob nossos pés que sustenta a civilização humana sobre a Terra. E essa relação de dependência, desde que a civilização começou há 6.000 anos, se caracteriza pelo uso dos ativos naturais relacionados ao solo (Brown, 2011). Nas últimas décadas, no entanto, a humanidade tem ultrapassado o nível de sustentação desse recurso (Earth..., 2021). Embora vivamos em uma sociedade altamente urbanizada e tecnologicamente avançada, somos tão dependentes dos sistemas de apoio natural da Terra quanto nossos ancestrais eram (Brown, 2011). Assim, proteger o solo garante a existência e sobrevivência das futuras gerações. Mas como protegê-lo se não o conhecemos? E como comunicar sua importância para uma Sociedade cada vez mais urbana que o enxerga ainda como poeira e sujeira?

Neste contexto, diversos autores (Hartemink, 2006; Hartemink; McBratney, 2008; Mol; Keesstra, 2012; Keesstra et al., 2016) vêm apontando o renascimento dos estudos envolvendo a ciência do solo em nível mundial. Ao enfatizarem a sua natureza holística (Churchman, 2010) e as interligações da ciência do solo com outros tópicos da ciência (Brevik et al., 2015), esses novos estudos indicam o papel do solo na resolução de algumas das questões ambientais globais mais prementes (Mol; Keesstra, 2012; Keesstra et al., 2016) e na definição de políticas públicas mundiais mais efetivas (Bouma et al., 2012; Keesstra et al., 2016).

O estudo dos solos, pela sua complexidade e importância para a humanidade, sempre demandou abordagens interdisciplinares, envolvendo biólogos, químicos, geólogos, agrônomos, físicos, entre outros. Porém, recentemente, essa lista passou a incluir antropólogos, economistas, engenheiros, médicos, militares, sociólogos e artistas. Essa perspectiva foi fortalecida pelo envolvimento de especialistas em ciência do solo em uma ampla gama de questões e temas críticos que impactam a sociedade, como: biodiversidade; biocombustíveis; mudanças do clima; serviços ecossistêmicos; segurança hídrica, alimentar e energética; degradação das terras; entre outros (Brevik et al., 2015). Hartemink (2006) diz que “se a ciência do solo fosse inventada hoje, seria mais independente da agricultura - pelo menos em locais onde os alimentos são abundantes”, ressaltando a importância atual em se tratar desse tema de forma transdisciplinar.

Nesta linha, novas abordagens relacionadas ao estudo dos solos surgiram nas últimas décadas. A primeira é a “*Saúde do solo*”, compreendida como a capacidade contínua do solo de funcionar como um sistema vivo, dentro dos limites do ecossistema e do uso da terra (Pankhurst, 1997). Esta abordagem defende que ao aumentar a matéria orgânica do solo, é possível melhorar a produtividade das plantas, aumentar o sequestro de carbono e reduzir o efeito estufa, melhorar a qualidade da água, reduzir a erosão e aumentar a infiltração e retenção de água, além de propiciar habitats mais adequados para a manutenção da biodiversidade. Há também a abordagem de “*Segurança do solo*”, mais abrangente e relacionada à qualidade do solo, à saúde do solo e à proteção do solo, defendida por McBratney et al. (2014). Esta segurança é tratada muitas vezes em conjunto com as seguranças hídrica, energética e alimentar. E ainda existe a abordagem

complementar, que é a dos “*Serviços ecossistêmicos dos solos*” (SES), que são derivados dos fluxos de capital natural do solo, benéficos para os seres humanos e que podem ser classificados em serviços de regulação, provisão e cultural (Dominati et al., 2010). Os SES são determinados pelo tipo e características dos solos, pela biota presente, pelo clima e pelas práticas agropecuárias ou de manejo ambiental em qualquer atividade humana ou empreendimento.

Na abordagem dos SES, destaca-se o entendimento da importância da multifuncionalidade da paisagem. Esta tem sido definida de várias formas, considerando o funcionamento geral e a provisão simultânea de vários processos, funções e serviços do ecossistema; as diferentes escalas; além de considerar o seu potencial em fornecer vários benefícios para a sociedade (Hector; Bagchi, 2007; Byrnes et al., 2014; Mastrangelo et al., 2014; Allan et al., 2015). O solo é um elemento integrador dos processos que ocorrem no ambiente e contribui de forma significativa para esta multifuncionalidade. Pois, o tipo de solo e posição na paisagem é que vão determinar a cobertura vegetal, maior ou menor provisão de água, manutenção da biodiversidade, que por sua vez propiciarão belezas cênicas e atrativos para a recreação e turismo, tão valorizados pelo homem, sendo classificados como serviços ecossistêmicos culturais. Além disso, onde a paisagem é diversificada, com a presença da vegetação natural, independente das atividades antrópicas presentes, maior será a provisão de serviços ecossistêmicos múltiplos, permitindo o bem-estar no meio rural e urbano.

Os solos, desempenham um papel fundamental no ciclo hidrológico, participando de processos como escoamento

superficial, infiltração, percolação, evapotranspiração e outros que interferem no armazenamento e disponibilidade de água para o suprimento das diferentes demandas humanas e manutenção da biodiversidade (Baveye, 2006; Nieder, 2006). Estimativas apontam que, em 2050, muitos países enfrentarão escassez hídrica e conflitos pelo uso da água (Nieder, 2006). Portanto, dentre as estratégias de segurança hídrica destacam-se uma melhor compreensão das diferentes classes dos solos, suas aptidões e práticas de manejo conservacionistas (Brevik et al., 2015).

O solo tem ainda um papel importante no contexto urbano. Além do planejamento do uso do solo para os diferentes empreendimentos e edificações urbanos, há uma tendência de desenvolver novas maneiras de integrar os solos ao espaço urbano, permitindo com que as cidades fiquem mais agradáveis, ampliando a provisão dos serviços ecossistêmicos e a qualidade de vida da população. Comunidades estão se formando em torno de áreas verdes, fazendas periurbanas têm se tornado escolas e a produção de alimentos está cada dia mais presente nas paisagens urbanas (Brevik et al., 2015). Desta forma, o componente solo tem sido mais evidenciado e valorizado sob o olhar urbano.

Um dos campos onde há espaço para significativas contribuições da pesquisa é na contaminação dos solos urbanos. A maioria da população mundial vive em áreas urbanas e suburbanas, e estão potencialmente expostas a contaminantes e patógenos depositados nos solos, por meio de uma série de vias, incluindo inalação, ingestão e contato dérmico. A contaminação ocorre por contato diretamente com o solo, mas também a partir da poeira derivada do solo que é depositada nas residências e outras áreas (Baveye, 2006). Muitos organismos do solo têm a capacidade de decompor

certos tipos de poluentes orgânicos e convertê-los em substâncias não tóxicas (FAO, 2020). A utilização do solo como elemento filtrante é uma opção importante para a gestão ambiental nas cidades. Também a compostagem de resíduos orgânicos e os aterros sanitários podem ser usados para gerar biogás, onde a fauna do solo pode ser usada para degradar os poluentes presentes (Lal, 2006).

Há também a crescente importância dos solos nos estudos arqueológicos e paleontológicos. O estudo em conjunto de especialistas em solos e arqueologia têm aumentado e tem um grande potencial de fornecer informações valiosas sobre o impacto da ocupação humana em um determinado local; na localização de artefatos e de formas de vida, bem como o do uso do solo pelas antigas populações; no entendimento da integridade de registos arqueológicos; assim como na evolução e mudança da paisagem, dentre outros (Brevik et al., 2015; Clement et al., 2015). Pode-se dizer que o solo na sua função de proteger vestígios arqueológicos e paleontológicos se caracteriza além de um patrimônio natural, mas também como um patrimônio cultural (Blum, 2006).

Acredita-se ainda que explorar a relação entre os solos e a arte possa oferecer novas formas de visualizar, interpretar e interagir com esse recurso (Feller et al., 2015). Os solos têm sido utilizados como material para a arte, como por exemplo, pigmentos nas pinturas antigas em cavernas, até as mais contemporâneas, denominadas “arte do solo”¹. A relação da arte com o solo ultrapassa a pintura, sendo também retratada na música, no cinema, nas esculturas, na poesia e na fotografia. Os solos podem formar um elemento visualmente marcante, adicionando sensações e textura à experiência de visualização. Alguns roteiristas e cineastas

mudaram a visão típica dos solos como um pano de fundo estático, valorizando-os como uma característica dinâmica do ecossistema. Obras de arte focadas em solos e paisagens oferecem uma forma diferente de perceber o solo, podendo contribuir para aumentar a conscientização sobre a sua importância e expandir o escopo da sua proteção (Feller et al., 2015).

Outro ponto digno de nota e só recentemente observado, são os efeitos benéficos (recreativos, de saúde, econômicos e ambientais) que o manejo caseiro de vasos de plantas ou jardins e, conseqüentemente, de solo, trouxeram para o cotidiano da população que se encontra em quarentena em virtude da pandemia do Covid-19. O isolamento em ambientes urbanos ou suburbanos é mais suportável se fazemos algo para manter nossos corpos e mentes ativos (Sofo; Sofo, 2020).

Percebe-se, portanto, que não é suficiente estudar e trazer respostas sobre os solos somente com foco na agricultura e pecuária como no passado, mas que é preciso recorrer a outras disciplinas e envolver diferentes atores para responder às complexidades das demandas humanas da atualidade. A ciência precisa estar sempre atuando na fronteira do conhecimento, com uma visão e olhar para o futuro, desenvolvendo tecnologias, e promovendo mudanças e rupturas nos conceitos e paradigmas. É também estratégico aprimorar habilidades em comunicação e interagir efetivamente com formuladores de políticas públicas, agências de financiamento, setor produtivo e sociedade em geral.

A interação da ciência do solo com a meteorologia, geologia, geografia e as engenharias civil e ambiental tem um caminho transdisciplinar sendo pavimentado, uma tradução do jargão das

diferentes ciências possibilitará no futuro, o uso de dados e informações dispersos nestas diferentes áreas para a solução de problemas e demandas da sociedade. Dentre estes cita-se a aptidão dos ambientes e seus solos para a construção de estradas, pontes, obras civis, áreas de lazer e até cemitérios. O entendimento de processos de recargas dos aquíferos e das reservas de água superficiais demandam estudos multidisciplinares, assim como a sua proteção quanto a poluição e contaminação. O fortalecimento das ciências de dados e dos fóruns multidisciplinares contribuirá para o avanço mais rápido desta necessária interação.

Acredita-se que o futuro da ciência do solo será provavelmente mais interdisciplinar e mais complexa, tendo um escopo mais amplo e capaz de associar aspectos tradicionais aos inovadores (Hartmann, 2006). Para atender às necessidades futuras de pesquisa de solos e sua ambiência, os cientistas do solo precisarão trabalhar com uma ampla gama de outros especialistas (Brevik; Sauer, 2015), construindo pontes entre diversas áreas do conhecimento.

Caráter multifuncional da Ciência do Solo: produção, bem-estar humano, funções do ecossistema e transferência de energia²

O solo, como um sistema aberto formado a partir da interação do clima, organismos, relevo, material de origem e tempo, traz em sua própria origem o conceito de transdisciplinaridade.

Embora a ciência do solo tenha se estruturado em estudos focados que geraram um rico conhecimento do recurso solo no Brasil, cada vez mais vem se evidenciando a importância de inserir

esse recurso natural em um contexto mais amplo, como estratégia de enfrentamento aos desafios globais. Muitas das atuais questões ambientais, sociais, econômicas, geológicas e de saúde humana podem ser melhor tratadas se a devida atenção for prestada aos solos.

Algumas das maiores pressões relacionadas ao uso da terra, tais como contaminação dos corpos hídricos e escassez hídrica; perda de biodiversidade; intensificação insustentável do uso do solo, que levam à compactação, acidificação e salinização; expansão urbana e consequente aumento de áreas impermeáveis; erosão do solo, especialmente em áreas agrícolas são exemplos da interconectividade dos solos com questões essenciais à nossa sociedade. Em nível global, muito tem se debatido sobre as mudanças do clima, mas nem sempre o solo, elemento fundamental no ciclo do carbono, recebe o merecido destaque.

As mudanças do clima evidenciam ainda outra questão a qual o solo tem grande importância: a necessidade de geração de energia por meio de fontes renováveis seja pelo cultivo de espécies aptas a gerarem energia (biocombustíveis) ou pelo aproveitamento da biomassa residual de outras culturas.

Assim, as evidências das multifunções do solo demonstram o seu potencial em mitigar e/ou reverter situações que expõem a fragilidade da nossa existência: a regulação do ciclo hidrológico, por ser o responsável por captar, purificar, armazenar e fornecer a maior parte da água que utilizamos; os benefícios para a saúde humana, que incluem a transferência de nutrientes do solo para as pessoas por meio de alimentos e a base para medicamentos - aproximadamente 40% de todos os medicamentos prescritos têm

sua origem no solo; habitat complexo, tem funções de banco de sementes e berçário para a conservação de diversas espécies, além de abrigar uma infinidade de organismos; e fornecer informações sobre nossa história, um arquivo arqueológico, contendo uma das principais fontes de informação sobre a história do homem antes da invenção da escrita; o solo e os sedimentos atuam ainda como arquivos geológicos que fornecem uma visão sobre as condições climáticas e ambientais do passado; e tantas outras funções.

Contaminação do solo e da água e impactos na saúde humana

Solo, água, plantas, animais e o ser humano, são parte de um sistema único, complexo e interdependente cujo crescente desequilíbrio ameaça o futuro da vida humana. O reequilíbrio das inter-relações dos elementos desse sistema em face dos desafios apresentados por uma crescente população global e de suas diversas necessidades, incluindo, alimentos saudáveis, água, energia, moradia, saneamento, dentre outras, está no centro do que se convencionou chamar de desenvolvimento sustentável. Endereçar esses desafios complexos exige uma abordagem multidisciplinar integrada e, portanto, um esforço continuado na quebra de paradigmas de formas e tipos de parcerias e arranjos institucionais para que a catalisação das interações produtivas entre disciplinas efetivamente ocorra.

A relação entre solo, água e saúde é de conhecimento comum. Não há vida saudável em meio ambiente insalubre. Saúde ambiental, humana e animal estão intrinsecamente associadas e a busca por soluções passa por uma abordagem holística, de Saúde Única. A resistência antimicrobiana (RAM) é um exemplo de tema

que expressa essa complexa relação entre ambiente, animais e ser humano e onde a abordagem multidisciplinar integrada é essencial no entendimento e na mitigação do problema.

Brevemente, a RAM se refere à capacidade dos micro-organismos de resistirem aos agentes destinados à sua eliminação ou inibição do seu crescimento e se tornou um problema de saúde pública em razão do uso excessivo e indiscriminado de antimicrobianos. Atualmente, mais de 700.000 mil pessoas morrem por ano no mundo em decorrência de infecções causadas por organismos resistentes aos antimicrobianos (infecções hospitalares, etc). Estima-se que esse número possa chegar a 10 milhões de mortes anuais até 2050, com prejuízos econômicos globais de até 100 trilhões de dólares. A Organização Mundial da Saúde (OMS) elegeu a RAM como um dos 10 mais importantes problemas de saúde pública. Mas a RAM não está apenas ligada ao tratamento ou prevenção de infecções nos seres humanos e animais. O uso de antimicrobianos é mais extenso e as consequências passam pela contaminação do solo e da água por resíduos e pela amplificação e disseminação de organismos resistentes e genes de resistência no complexo sistema ambiente-animal-humano, com impactos que vão desde a morte por infecções por organismos resistentes contraídos em hospitais ou via alimentos contaminados até a disfunções ecossistêmicas da microbiota ambiental, com efeitos na sustentabilidade dos sistemas agropecuários e nas mudanças do clima. Na agropecuária, além do tratamento e prevenção de infecções animais, os antimicrobianos são usados também como promotores de crescimento em animais de produção, prolongadores da vida útil de produtos alimentares e em processos agroindustriais, como na produção de etanol. Atualmente, estima-se que mais de 70% dos antimicrobianos usados no mundo sejam consumidos por

animais de produção. A previsão é de que o volume atual de uso aumente mais de 60% a nível mundial e praticamente dobre no Brasil e em outros países em desenvolvimento até 2030 (Boeckel et al., 2015). Isto por causa da tendência à intensificação dos sistemas produtivos para atender à crescente demanda mundial por proteína animal. O Brasil é considerado um dos “hotspots” mundiais para o desenvolvimento da RAM em animais e humanos.

A mitigação da RAM passa, antes de mais nada, por um entendimento profundo dos processos envolvidos na sua perpetuação, nos seus impactos e no desenvolvimento de opções de controle e prevenção. Por exemplo, os genes de resistência circulam entre as microbiotas ambiental, animal, humana e alimentar via diferentes rotas, num fluxo complexo e auto-perpetuante que precisa ser melhor entendido para o desenvolvimento de medidas de monitoramento, controle e prevenção. Da mesma forma, os efeitos da RAM na composição e dinâmica da microbiota do solo e os possíveis impactos nas suas funções ecossistêmicas, necessita melhor compreensão. O uso de dejetos da pecuária e de resíduos da agroindústria incorporados ao solo, seus possíveis impactos e alternativas de uso seguro e opções para tratamento da água efluente dos sistemas agropecuários são outros exemplos onde a pesquisa é fundamental.

Políticas públicas de vanguarda nas áreas de serviços ecossistêmicos e ambientais, sustentabilidade dos sistemas agropecuários, qualidade da água, manejo de dejetos e resíduos, saúde animal e humana, inocuidade dos alimentos e até comércio internacional necessitam da geração de conhecimento em RAM que, por sua vez, passa obrigatoriamente pelo fomento a projetos que abordem a relação ambiente-animal-humano como um sistema

complexo e interdependente integrando disciplinas que vão desde a biologia molecular, a bioinformática, e a nanotecnologia até a epidemiologia, a ecologia e a sociologia.

Multidisciplinaridade na Ciência do Solo

Um dos grandes desafios é fomentar uma maior interação entre pedologia e pedometria com outras áreas. A multidisciplinaridade contribui para inovação e valorização da área pela sociedade. **Acredita-se que, tanto a pedologia e a pedometria, como outras ciências do solo (física, química, biologia, fertilidade, manejo, conservação) se beneficiarão se forem associadas a outras ciências. Cada vez mais, a solução parece ser a migração para uma ciência interdisciplinar e aplicada para resolver problemas reais da agricultura.** Elas terão que trabalhar em maior consonância para atender às demandas do setor produtivo, que requer cada vez mais atuação dentro da fazenda para resolver problemas específicos dos produtores agrícolas.

A saúde do solo e o futuro da biodiversidade global

Os solos são um dos principais reservatórios globais da biodiversidade. Essa condição o torna um ecossistema dinâmico e complexo, de estreita interface entre a geosfera, atmosfera,

hidrosfera e biosfera que predispõe enfaticamente as futuras pesquisas em Ciência do Solo ao desafio da transdisciplinaridade.

Os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) tem relação muito próxima com as principais funções do solo, entre as quais se destacam o sequestro e a manutenção de carbono, a ciclagem de nutrientes, o fluxo de ar, a infiltração e armazenamento de água, estes diretamente relacionados à qualidade da sua estrutura e, a manutenção e a proteção da biodiversidade. Sendo crucial para manter o solo saudável, projetar estudos que promovam e protejam a biodiversidade deste recurso natural, o que amenizará direta ou indiretamente os efeitos das mudanças do clima e propiciará a manutenção de serviços ecossistêmicos importantes para o bem-estar humano e sua sobrevivência no planeta.

Nesse contexto o relatório *State of knowledge of soil biodiversity: status, challenges and potentialities* da FAO (FAO et al., 2020) aponta alguns benefícios da biodiversidade do solo: a conservação e melhoria da qualidade da água, a diminuição de poluentes ambientais, a captura e armazenamento de carbono atmosférico e a mitigação do risco de doenças transmitidas por alimentos. Para a inclusão da biodiversidade do solo em estudos, devem ser incentivados: 1. Métodos rápidos e economicamente viáveis para a determinação da saúde do solo; 2. Métodos acessíveis para medir mudanças no concentração e estoques de carbono orgânico do solo; 3. Ferramentas digitais e mapas de monitoramento eficientes para aumentar o potencial de bio-indicação, importantes aos tomadores de decisão e 4. Os conhecimentos pedológicos devem estar em escalas suficientes para fornecer dados no âmbito de propriedades agrícolas e ou de bacias hidrográficas e promover o

manejo sustentável, e devem requerer modelos baseados em big data gerados a partir de informações do nexus solo-água-planta.

A integração entre os setores da saúde e da agricultura devem ser fortalecidos para enfrentar crises sanitárias a partir da melhor compreensão dos elos entre atributos da biodiversidade do solo. Assim também, conjunto de dados mínimos de microrganismos do solo devem ser integrados em propostas de indicadores biológicos menos complexos, para facilitar a medição dos impactos de curto e longo prazo da agricultura na saúde do solo. A inteligência artificial tem grande potencial para a organização de dados e agregação de informações de vários bancos de dados. Novas tecnologias emergentes com abordagens metagenômicas, metabolômicas e volatilômicas podem fornecer informações úteis sobre funções microbianas, além da diversidade taxonômica do microbioma do solo (FAO et al., 2020).

Modelos de produção diversificados e integrados envolvendo culturas com elevado potencial de aporte de fitomassa da parte aérea e raízes devem ser testados em escala local, pois além de melhorar a biodiversidade no âmbito da rizosfera gerando benefícios à infiltração e drenagem da água, absorção de nutrientes e aeração do solo, propiciam, ao mesmo tempo, retorno econômico ao produtor, por ampliar a produção de alimentos, fibras e bioenergia. Ferramentas para avaliar a qualidade do manejo e da conservação do solo em propriedades agrícolas e em microbacias hidrográficas têm sido propostas, tais como o Diagnóstico Rápido da Estrutura do Solo – DRES (Ralisch et al., 2017), o Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto – IQP (Martins et al., 2018) e o Índice de Dissipação da Erosividade – IDE (Hernani et al., 2020), no

entanto, esses e outros indicadores ainda requerem estudos em diferentes condições ambientais para ampliar a sua validação e uso.

O manejo e o uso eficientes do solo e da água promovem inter-relações e influências na biodiversidade do solo e requerem mudanças transformadoras na percepção do agricultor e da sociedade consumidora com vistas à melhoria e manutenção da saúde/qualidade do solo. E, enfim, espera-se que no futuro, planos governamentais levem à definitiva conscientização do humano rural e urbano sobre a importância do solo e ofereçam também o adequado fomento ao correto uso e manejo do solo que induzam, ao longo do tempo, ao aprimoramento, à preservação e à sustentação da melhor qualidade da vida na Terra.

Referências

ALLAN, E.; MANNING, P.; ALT, F.; BINKENSTEIN, J.; BLASER, S.; BLÜTHGEN, N.; BÖHM, S.; GRASSEIN, F.; HÖLZEL, N.; KLAUS, V. H.; KLEINEBECKER, T.; MORRIS, E. K.; OELMANN, Y.; PRATI, D.; RENNER, S. C.; RILLIG, M. C.; SCHAEFER, M.; SCHLOTER, M.; SCHMITT, B.; SCHÖNING, I.; SCHRUMPF, M.; SOLLY, E.; SORKAU, E.; STECKEL, J.; STEFFEN-DEWENTER, I.; STEMPFHUBER, B.; TSCHAPKA, M.; WEINER, C. N.; WEISSER, W. W.; WERNER, M.; WESTPHAL, C.; WILCKE, W.; FISCHER, M. Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. **Ecology Letters**, v. 18, n. 8, p. 834-843, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1111/ele.12469>.

BAVEYE, P. A vision for the future of soil science. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 10-12. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

BLUM, W. E. H. The future of soil science. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 16-18. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

BOECKEL, T. P. van; BROWER, C.; GILBERT, M.; GRENFELL, B. T.; LEVIN, S. A.; ROBINSON, T. P.; TEILLANT, A.; LAXMINARAYAN, R. Global trends in antimicrobial use in food animals. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 18, p. 5649-5654, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1503141112>.

BOUMA, J.; BROLL, G.; CRANE, T. A.; DEWITTE, O. GARDI, C.; SCHULTE, R. P. O.; TOWERS, W. Soil information in support of policy making and awareness raising. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 552-558, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.07.001>.

BREVIK, E. C.; CERDÀ, A.; MATAIX-SOLERA, J.; PEREG, L.; QUINTON, J. N.; SIX, J. VAN OOST, K. The interdisciplinary nature of soil. **SOIL**, v. 1, n. 1, p. 117-129, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-117-2015>.

BREVIK, E. C.; SAUER, T. J. The past, the present and the future of soils and human health. **SOIL**, v. 1, n. 1, p. 35-46, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-35-2015>.

BROWN, L. R. Eroding futures: why healthy soil matters to civilization. **The Futurist**, p. 23-30, Jul./Aug. 2011. Disponível em: http://www.earth-policy.org/images/uploads/press_room/Futurist_Issue_Jul_Aug_2011_Brown.pdf. Acesso em: 12 maio 2021.

BYRNES, J. E.; GAMFELDT, I.; ISBELL, F.; LEFCHECK, J. S.; GRIFFIN, J. N.; HECTOR, A.; CARDINALE, B. J.; HOOPER, D. U.; DEE, L. E.; DUFFY, J. M. Investigating the relationship between biodiversity and ecosystem multifunctionality: challenges and solutions. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 5, n. 2, p. 111-124, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12143>.

CHURCHMAN, G. J. The philosophical status of soil science. **Geoderma**, v. 157, n. 3/4, p. 214-221, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.018>.

CLEMENT, C. R.; DENEVAN, W. M.; HECKENBERGER, M. J.; JUNQUEIRA, A. B.; NEVES, A. G.; TEIXEIRA, W. G.; WOODS, W. I. The domestication of Amazonia before European conquest. **Proceedings of the Royal Society B: biological sciences**, v. 282, n. 1812, 20150813, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.0813>.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858-1868, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>.

EARTH OVERSHOOT DAY. Disponível em: <https://www.overshootday.org/>. Acesso em: 12 maio 2021.

FAO. **Dia mundial do solo**: a biodiversidade do solo é a base da vida humana. Brasília, DF, 2020. Disponível em: <http://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1361870/>. Acesso em: 25 jan. 2021.

FAO; ITPS; GSBI; SCBD; EC. **State of knowledge of soil biodiversity**: status, challenges and potentialities: report 2020. Rome, FAO, 2020. 618 p. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb1928en>.

FELLER, C.; LANDA, E. R.; TOLAND, A.; WESSOLEK, G. Case studies of soil in art. **SOIL**, v. 1, n. 2, p. 543-559, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-1-543-2015>.

HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A. A soil science renaissance. **Geoderma**, v. 148, n. 2, p.123-129, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.006>.

HARTMANN, A. Future of soil science. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 54-56. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

HECTOR, A.; BAGCHI, R. Biodiversity and ecosystem multifunctionality. **Nature**, v. 448, p. 188-190, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature05947>.

HERNANI, L. C.; GONÇALVES, A. O.; ORTOLAN, B.; SOUZA, E. F. de. **Procedimentos para determinação do Índice de Dissipação de Erosividade (IDE)**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2020. E-book. (Embrapa Solos. Documentos, 214). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/214050/1/CNPS-DOC-214-2020.epub>. Acesso em: 2 fev. 2022.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Classificação e valoração dos serviços do ecossistema do solo. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v. 145, p. 24-38, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agry.2016.02.010>.

KESSTRA, S. D.; BOUMA, J.; WALLINGA, J.; TITTONELL, P.; SMITH, P.; CERDA, A.; MONTANARELLA, L.; QUINTON, J. N.; PACHEPSKY, Y.; VAN DER PUTTEN, W. H.; BARDGETT, R. D.; MOOLENAAR, S.; MOL, G. JANSEN, B.; FRESCO, L. O. The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations Sustainable Development Goals. **SOIL**, v. 2, n. 2, p. 111-128, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5194/soil-2-111-2016>.

LAL, R. Soil science in the era of hydrogen economy and 10 billion people. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 76-79. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

MARTINS, A. L. da S.; CONTE, O.; OLIVEIRA, P. de; DOSSA, A. A.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; HERNANI, L. C.; RALISCH, R.; LEONARDO, H. C. L.; LUNARDI, L.; SALTON, J. C.; TOMAZI, M.; PITOL, C.; DE BONA, F. D.; BOEIRA, R. C. **Avaliação ex ante do Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto (IQP) com produtores do Centro-Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2018. 52 p. (Embrapa Solos. Documentos, 203). Disponível em: <http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/190814/1/CNPS-DOC-203-2018.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

MASTRANGELO, M. E.; WEYLAND, F.; VILLARINO, S. H.; BARRAL, M. P.; NAHUELHUAL, L.; LATERRA, P. Concepts and methods for landscape multifunctionality and a unifying framework based on ecosystem services. **Landscape Ecology**, v. 29, p. 345-358, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9959-9>.

MCBRATNEY, A.; FIELD, D. J.; KOCH, A. The dimension of soil security. **Geoderma**, v. 213, p. 203-213, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.08.013>.

MOL, G.; KEESSTRA, S. Soil science in a changing world. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 4, n. 5, p. 473-477, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.013>.

NIEDER, R. Future of soil science. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 97-100. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

PANKHURST, C. E.; DOUBE, B. M.; GUPTA, V. V. S. R. (ed.). **Biological indicators of soil health**. Wallingford: CAB International, 1997. ISBN: 978-08-5-199158-0.

RALISCH, R.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; TOMAZI, M.; HERNANI, L. C.; MELO, A. da S.; SANTI, A.; MARTINS, A. L. da S.; BONA, F. D. de. **Diagnóstico rápido da estrutura do solo - DRES**. Londrina: Embrapa Soja, 2017. 63 p. (Embrapa Soja. Documentos, 390). Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/160858/1/Doc-390-OL.pdf>. Acesso em: 1 fev. 2022.

SOFO, A.; SOFO, A. Converting home spaces into food gardens at the time of Covid-19 quarantine: all the benefits of plants in this difficult and unprecedented period. **Human Ecology**, v. 48, p. 131-139, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00147-3>.

TOLAND, A.; WESSOLEK, G. Merging horizons: soil science and soil art. In: LANDA, E. R.; FELLER, C. (ed.). **Soil and culture**. Dordrecht: Springer, 2009. p. 45-66. DOI: https://doi.org/10.1007/978-90-481-2960-7_4.

Literatura recomendada

ACAR, J. F.; MOULIN, G. Antimicrobial resistance: a complex issue. **Revue Scientifique et Technique**, v. 31, n. 1, p. 23-31, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.20506/rst.31.1.2098>.

AMARASIRI, M.; SANO, D.; SUZUKI, S. Understanding human health risks caused by antibiotic resistant bacteria (ARB) and antibiotic resistance genes (ARG) in water environments: current knowledge and questions to be answered. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 50, n. 19, p. 2016-2059, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1692611>.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Comissão sobre Prevenção da Resistência aos Antimicrobianos em Animais. **Plano de Ação Nacional de Prevenção e Controle da Resistência aos Antimicrobianos no Âmbito da Agropecuária 2018-2022**: PAN-BR AGRO. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-pecuarios/resistencia-aos-antimicrobianos/pan-br-agro/PANBRAGROv.1.0maio2018.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Departamento de Vigilância das Doenças Transmissíveis. **Plano de Ação Nacional de Prevenção e Controle da Resistência aos Antimicrobianos no Âmbito da Saúde Única 2018-2022:** PAN-BR. Brasília, DF, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/publicacoes-svs/antimicrobianos/plano-nacional-antimicrobianos-pan-br-14fev19-isbn.pdf/@/download/file/plano-nacional-antimicrobianos-pan-br-14fev19-isbn.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2022.

CHEN, C.; RAY, P.; KNOWLTON, K. F.; PRUDEN, A. XIA, K. Effect of composting and soil type on dissipation of veterinary antibiotics in land-applied manures. **Chemosphere**, v. 196, p. 270-279, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.161>.

COUGHLAN, K. The future of soil science: view from a developing country. In: HARTEMINK, A. E. (ed.). **The future of soil science**. Wageningen: IUSS, 2006. p. 31-33. Disponível em: https://www.iuss.org/media/2006-future-of-soil-science_1.pdf. Acesso em: 2 fev. 2022.

DA COSTA, P.; LOUREIRO, L.; MATOS, A. Transfer of multidrug-resistant bacteria between intermingled ecological niches: the interface between humans, animals and the environment. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 10, n. 1, p. 278-294, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph10010278>.

D’COSTA, V. M.; GRIFFITHS, E.; WRIGHT, G. D. Expanding the soil antibiotic resistome: exploring environmental diversity. **Current Opinion in Microbiology**, v. 10, n. 5, p. 481-489, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mib.2007.08.009>.

FORBES, J. D.; KNOX, N. C.; RONHOLM, J.; PAGOTTO, F.; REIMER, A. Metagenomics: the next culture-independent game changer. **Frontiers in Microbiology**, v. 8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01069>.

INTERAGENCY COORDINATION GROUP ON ANTIMICROBIAL RESISTANCE. **No time to wait: securing the future from drug-resistant infections: report to the Secretary-General of the United Nations**. 2019. Disponível em: https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/no-time-to-wait-securing-the-future-from-drug-resistant-infections-en.pdf?sfvrsn=5b424d7_6&download=true. Acesso em: 2 fev. 2022.

LE PAGE, G.; GUNNARSSON, L.; SNAPE, J.; TYLER, C. R. Integrating human and environmental health in antibiotic risk assessment: a critical analysis of protection goals, species sensitivity and antimicrobial resistance. **Environment International**, v. 109, p. 155-169, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.09.013>.

REICHERT, G.; HILGERT, S.; FUCHS, S.; AZEVEDO, J. C. R. Emerging contaminants and antibiotic resistance in the different environmental matrices of Latin America. **Environmental Pollution**, v. 255, pt. 1, 113140, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113140>.

WOOLDRIDGE, M. Evidence for the circulation of antimicrobial-resistant strains and genes in nature and especially between humans and animals. **Revue Scientifique et Technique**, v. 31, n. 1, p. 231-247, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.20506/rst.31.1.2109>.

Notas

¹ Subcampo da arte ambiental, a arte do solo compreende uma ampla gama de disciplinas artísticas além da pintura e da escultura, incluindo instalação, performance, fotografia, vídeo e cinema, animação, arquitetura paisagística, remediação ambiental e Internet (Toland; Wessolek, 2009).

² Seção baseada em Jónsson e Davíðsdóttir (2016).

Capítulo 9. Desafios para o século XXI

Lívia Abreu Torres, Silvia Kanadani Campos, Julia Franco Stuchi, Cláudio Lucas Capeche e Marcos Aurélio Santiago Françoço

O solo é recurso natural não renovável, responsável pela sustentação da vida no planeta. É a base para inúmeras atividades, tais como produção de alimentos, de energia sustentável (biocombustíveis), de materiais minerais, medicinais e farmacêuticos, de fibras e madeira. Adicionalmente, contribui ainda para manter a biodiversidade, mitigar a mudança do clima, promover a segurança alimentar e nutricional, energética, ambiental, social e econômica do país.

Dada a sua importância, a busca pela preservação dos solos tem sido foco da ciência nas últimas décadas. A evolução das práticas de manejo e a geração de novos conhecimentos possibilitaram tanto a redução da erosão quanto a manutenção da saúde desse recurso natural. Nessa mesma linha, obteve-se também o aumento da eficácia dos fertilizantes, o desenvolvimento de tecnologias de sensoriamento remoto e a ampliação da compreensão sobre os componentes físicos, químicos e biológicos do solo.

Descobertas e soluções como estas contribuíram para a modernização da agricultura brasileira, transformando-a num dos mais importantes setores econômicos do Brasil, rico em tecnologias de ponta, referência em inteligência, produtividade e sustentabilidade. Apesar dessas conquistas, os desafios da Ciência do Solo continuam crescentes.

Nas últimas décadas, ameaças relevantes à sustentabilidade do solo intensificaram-se, submetendo esse recurso à degradação e comprometendo suas características intrínsecas, sejam elas físicas, químicas, morfológicas ou biológicas. Além disso, este recurso tem sofrido outras ameaças como erosão, desequilíbrio de nutrientes, perdas de carbono e biodiversidade, acidificação, contaminação, salinização e compactação.

Para combatê-las, novas abordagens integradas são necessárias. A convergência entre conhecimentos de disciplinas distintas é uma estratégia-chave na obtenção de soluções que agreguem valor e descortinem novas possibilidades para a sustentabilidade do solo. Naturalmente, para isso ocorrer, e continuar contribuindo com a viabilização dos futuros ciclos de desenvolvimento do Brasil, é preciso investir no avanço do conhecimento, na geração de novas tecnologias e no aperfeiçoamento das que já existem.

O desafio não é apenas continuar gerando informação. É necessário processá-la e transformá-la em conhecimento, com enfoque interdisciplinar, que será aplicado em seu pleno potencial tanto no processo produtivo como no apoio à construção de políticas públicas e marcos regulatórios. É fundamental ampliar a interação com outras ciências, tornando-a mais integrativa e holística. Assim, ela será capaz de associar seus aspectos tradicionais a novos desafios, tecnologias e conhecimentos, em prol da busca pela solução dos problemas que desafiam a sociedade no século XXI.

Avanços na conservação do solo e da água, por exemplo, foram impulsionados pela construção de novos conhecimentos oriundos da interação entre a pesquisa, realidade dos agricultores no campo e formuladores de políticas públicas. Pesquisas na saúde do solo

têm fomentado cada vez mais o trabalho em rede, envolvendo diversos setores, como agricultores, especialistas, além de organizações comunitárias, públicas e privadas, acelerando a compreensão dos ecossistemas do solo e compartilhando descobertas.

Todas essas novas possibilidades, associadas ao conhecimento já consolidado na Ciência do Solo, poderão subsidiar mudanças significativas no combate à degradação ambiental e na promoção da sustentabilidade do uso do solo. Conectar elementos como disciplinas, setores, pessoas e conhecimento é um dos principais pilares para inovação.

A análise das informações disponíveis no presente apontam para sinais futuros. Um exemplo disso é o crescente protagonismo da agricultura de precisão. Futuras tecnologias de precisão dedicadas à conservação, usando técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial, possibilitarão melhor gerenciamento da variabilidade espacial e temporal. Outra agenda em expansão será a intensificação sustentável, a qual traz consigo o incremento e a diversificação sobre a percepção de riscos agropecuários e suas consequências para a sociedade. Destacam-se também os avanços nos conhecimentos relacionados à biologia do solo e seu potencial para o aumento da produtividade agrícola e fortalecimento da sustentabilidade desse recurso natural.

Expandiremos cada vez mais fronteiras consideradas “impossíveis” há poucos anos: agricultura no deserto, agricultura no mar, agricultura vertical e espacial são alguns exemplos. De fato, as inovações relacionadas a diversos tipos alternativos de cultivo estão em ascensão e, certamente, receberão cada vez mais fomento,

sobretudo porque o solo e a água serão cada vez mais escassos, configurando-se como uma das principais commodities deste século.

Relacionando esse contexto mais amplo e a realidade do Brasil, identificam-se importantes tópicos para promover o desenvolvimento sustentável da agricultura nacional nos próximos anos: a ampliação do conhecimento sobre os solos brasileiros, com adequada governança e política de gestão de dados para compartilhamento de informações; o envolvimento e comprometimento dos atores com o uso, manejo e conservação dos solos intensificado por ações concretas no campo, no âmbito da educação em solos e trocas de experiências, e em fomentos ativos à políticas públicas; o desenvolvimento de métodos de análise de solo mais baratos, rápidos e menos poluentes; o aprofundamento de técnicas de edição de genes; e o sequenciamento massivo de organismos e amostras ambientais, para sua caracterização e identificação de uso potencial.

Para lidar com esse ambiente, com suas características e nuances, as megatendências: “*Convergência das tecnologias digitais e da informação*”; “*Bioeconomia e biotecnologia na ciência do solo*”; “*Intensificação da agricultura com sustentabilidade*”; “*Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais*”; “*Serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis*” e “*A saúde do solo*” sinalizam inúmeras ameaças e oportunidades que se desdobrarão em importantes desafios para os próximos anos.

As megatendências servem como balizas em uma rota de navegação. O futuro não é linear, novos elementos e mudanças

imprevistas certamente ocorrerão. Por isso, precisamos permanecer vigilantes, investir em conhecimento, monitoramento e estratégias de antecipação. Para colaborar com o constante processo de monitoramento, planejamento e ação impulsionados por uma visão de longo prazo, elencamos a seguir alguns desafios que têm potencial para promover avanços nas ciências dos solos, gerando oportunidades para agricultura, desenvolvimento econômico e bem-estar social.

Desafios para Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação

Convergência das tecnologias digitais e da informação

- Utilizar informações e ferramentas ligadas a geotecnologias, informações de satélites e sistemas computacionais avançados envolvendo Big Data, em escala compatível com os níveis de bacia hidrográfica ou propriedade rural, visando o manejo agrícola com foco na degradação neutra das terras, e ou sob a ótica do nexus solo-água-planta-atmosfera;
- Promover mapeamentos multiescalares e análises integradas de dados dos solos tropicais, por meio do uso das tecnologias digitais;
- Investir em integração de tecnologias convergentes (Big Earth Observation Data; Internet Of Things – IoT; Digital Soil Mapping, SIGWebs) visando desenvolver soluções inovadoras para problemas do agro;

- Conectar as análises de clima e erosão a modelos que possam avaliar os impactos na saúde do solo e nas emissões de gases de efeito estufa;
- Integrar indicadores biológicos em um conjunto de dados mínimos de microrganismos do solo para facilitar a medição dos impactos de curto e longo prazo da agricultura na saúde do solo;
- Fornecer infraestrutura de qualidade e segura para conexão do meio rural à internet e propiciar a apropriação das soluções de IOT pelos agricultores;
- Ampliar a capacidade de processamento e análise de grande massa de dados de observação da superfície terrestre disponíveis;
- Desenvolver plataformas digitais para armazenamento, consolidação, análises integradas, compartilhamento e gestão de base de dados;
- Aumentar investimentos em supercomputadores para que previsões e predições hidrometeorológicas possam ser feitas no sentido de dar suporte a tomadas de decisão;
- Desenvolver métodos rápidos e economicamente viáveis para a avaliar a saúde do solo;
- Desenvolver tecnologias de análise do solo que minimizem ou eliminem o descarte de resíduos químicos poluentes.

Bioeconomia e biotecnologia na Ciência do Solo

- Fomentar estudos do microbioma associados às plantas e solo para identificação de organismos e moléculas derivadas destes e interações de interesse para os sistemas sustentáveis de produção;
- Desenvolver métodos e instrumentos para detectar comunidades microbianas, correlacionando-os às funções críticas do solo e aplicações da microbiologia do solo nos sistemas de produção;
- Promover progressos na compreensão dos organismos do solo e seu papel nos ecossistemas, entendendo quais fatores causam mudanças na biodiversidade edáfica e como ela se relaciona com as funções dos solos;
- Promover o uso de bioinsumos na agricultura auxiliando na redução de emissão de gases de efeito estufa e descarbonificação da agricultura;
- Aumentar da oferta de bioinsumos de forma a mitigar as perdas de biodiversidade nas áreas rurais, aumentar a segurança alimentar e substituir ou complementar o uso de agroquímicos sintéticos;
- Incentivar os estudos visando promover o processo de inovação, envolvendo biofábricas eficientes para produção de produtos químicos, remédios, combustíveis e outros materiais a partir da engenharia metabólica;
- Avançar em protocolos de avaliação da saúde do solo para monitoramento das lavouras na aplicação de práticas de produção sustentáveis;

- Aprofundar a discussão com a sociedade civil e instâncias regulatória sobre o uso de ferramentas de biotecnologia no desenvolvimento de “modificações genéticas artificiais”.

Intensificação da agricultura com sustentabilidade

- Minimizar os processos de degradação do solo por meio do desenvolvimento e uso de sistemas de produção sustentáveis e do aumento do nível de conhecimento sobre os solos brasileiros em escalas adequadas;
- Fomentar a caracterização, detecção remota e recuperação de solos/pastagens degradadas, considerando as aplicações em múltiplas escalas - do local ao regional;
- Promover a reinserção de extensas áreas ocupadas com pastagens degradadas à cadeia de produção agropecuária, por meio de sistemas de produção tecnicamente avaliados, sustentáveis e adequados a cada realidade socioambiental;
- Estimular práticas conservacionistas capazes de melhorar a qualidade do solo, a infiltração e o fluxo de base que alimenta os mananciais superficiais de água no período de estiagem, a retenção de água na bacia hidrográfica.
- Combater a erosão e a desertificação;
- Promover o desenvolvimento da mecanização para sistemas integrados;
- Desenvolver modelos e cenários futuros sobre os impactos da mudança do clima na agropecuária;

- Estimular a adoção de práticas agrícolas que promovam o uso sustentável e a conservação do solo e da água aumentando a resiliência aos impactos da mudança do clima no meio rural;
- Investir no desenvolvimento de tecnologias para sistemas de produção mais resilientes à mudança do clima;
- Investir em estratégias de adaptação e mitigação a mudanças climáticas envolvendo paisagens florestadas;
- Promover zoneamentos climáticos para a agricultura;
- Fomentar a integração de dados de solo (de atributos químicos, físicos e biológicos), de forma a estabelecer programas e estratégias de investimentos continuado de compensação por bom uso do solo e da água em propriedades rurais.
- Promover políticas de conservação e recuperação de solos agrícolas com vistas à reinserção de áreas degradadas à cadeia produtiva, e programas abrangentes para a recuperação e conservação dos solos;
- Valorar a eficiência de sistemas agropecuários integrados e conservacionistas;
- Desenvolver indicadores e métodos de baixo custo para a quantificação, monitoramento e valoração dos impactos da mudança do clima na agropecuária no solo e na água;
- Desenvolver modelagem para monitoramento hidrológico visando a valoração econômica de práticas agrícolas que promovam a contenção dos processos erosivos e assoreamento dos corpos hídricos, contribuindo para a redução dos custos do tratamento da água;

- Desenvolver estudos em diferentes condições ambientais para ampliar a validação e o uso de indicadores como o Índice de Qualidade Participativo do Plantio Direto – IQP e o Índice de Dissipação da Erosividade – IDE.

Crescente importância de fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes par solos tropicais

- Intensificar o desenvolvimento de ferramentas para avaliar/monitorar de forma adequada a fertilidade dos solos, avançando na otimização recomendação e aplicação de insumos pela agricultura digital e/ou de precisão;
- Promover o desenvolvimento de fontes alternativas biológicas para o melhor aproveitamento ou como fonte de nutrientes (bioinsumos);
- Definir fontes e o potencial de uso de agrominerais silicáticos na melhoria da fertilidade dos solos;
- Investir na pesquisa para o desenvolvimento e/ou aperfeiçoamento de formulações fertilizantes de eficiência aumentada para redução do custo de aplicação e nos impactos ambientais;
- Desenvolver condicionadores de solo eficazes para o aumento da eficiência dos insumos utilizados na agricultura (ênfase na linha biológica e formas de aplicação nutrientes mais eficientes, em especial via foliar, utilizando nanotecnologia);

- Desenvolver tecnologias e sistemas de manejo que promovam o aproveitamento do reservatório de fósforo residual dos solos de áreas tradicionais de produção agrícola;
- Promover o aperfeiçoamento dos sistemas oficiais de regulação e fiscalização para garantir composição química e qualidade dos fertilizantes.

Serviços ecossistêmicos no contexto da produção e consumo sustentáveis

- Promover estudos sobre a biodiversidade do solo e sua influência na prestação de serviços ecossistêmicos, com destaque para a capacidade de adaptação às mudanças climáticas;
- Propor e implementar programas para garantir a segurança alimentar e nutricional e os serviços ecossistêmicos mediante o estabelecimento de sistemas alimentares sustentáveis, inclusivos e resilientes;
- Propor e implementar sistemas de produção agropecuários integrados e focados na provisão de serviços ecossistêmicos múltiplos;
- Potencializar o reconhecimento do valor da diversidade cultural para a manutenção dos sistemas sociobiodiversos com iniciativas como mercados verdes, modalidades de turismo sustentável e mecanismos de incentivo ao uso e manejo sustentável dos recursos naturais;

- Propor diretrizes para adotar, orientar, planejar, projetar, implementar, e avaliar as soluções baseadas na natureza- SbN; incluindo programas educacionais e de treinamento para fortalecer o conhecimento e as capacidades em SbN;
- Monitorar impactos das soluções baseadas na natureza- SbN em diferentes escalas e dimensões espaciais e temporais, estabelecendo uma estrutura comum e sistêmica;
- Promover estratégias de planejamento integrado urbano e rural que possam assegurar melhor qualidade de vida e oferta de múltiplos serviços ecossistêmicos aos habitantes das áreas urbanas;
- Promover programas educacionais e de treinamento para fortalecer conhecimento e capacidades em SbN;
- Estabelecer parâmetros para planejamento e gestão de paisagens multifuncionais de forma sustentável;
- Fortalecer mecanismos de incentivo ao manejo sustentável do solo e da água no meio rural, incluindo os pagamentos por serviços ambientais, certificação e créditos de carbono;
- Promover estratégias de planejamento de bacias hidrográficas, com a elaboração e implantação de políticas de incentivo à proteção e restauração de matas ciliares e nascentes, adequação de estradas, bem como para nortear a destinação correta de resíduos sólidos e líquidos;
- Estabelecer métricas e mecanismos para avaliar e promover o uso e manejo eficiente do solo na agricultura com a promoção de serviços ecossistêmicos considerando aspectos econômicos, sociais e ambientais;

- Desenvolver metodologias para avaliação, valoração e simulação de serviços ecossistêmicos em diferentes escalas e contextos sociais e ambientais, incluindo métodos de baixo custo;
- Analisar e avaliar de forma integrada as estruturas, as funções, os processos e os serviços ecossistêmicos, bem como os conflitos e as sinergias entre diferentes serviços, para orientar a tomada de decisão na gestão de paisagens.

A saúde do solo

- Promover transdisciplinaridade na ciência do solo, associando a pedologia e pedometria a outras ciências do solo (física, química, biologia, fertilidade, manejo, conservação dos solos) com foco nos problemas de segurança hídrica e alimentar;
- Aproveitar as novas tecnologias emergentes com abordagens biotecnológicas baseadas em biologia molecular avançada para fornecer informações úteis sobre funções microbianas, além da diversidade taxonômica do microbioma do solo;
- Promover maior integração e investimentos em PD&I entre os setores públicos e privados;
- Aumentar a conexão entre pesquisa e a transferência de tecnologia;
- Promover a compostagem de resíduos orgânicos e os aterros sanitários para geração de biogás, onde a fauna do solo pode ser usada para degradar os poluentes presentes;

- Aprofundar o entendimento dos processos envolvidos na perpetuação da RAM e seus impactos, bem como o desenvolvimento de opções para o seu controle e prevenção;
- Melhorar a compreensão dos efeitos da RAM na composição e dinâmica da microbiota do solo e os possíveis impactos nas suas funções ecossistêmicas;
- Implementar políticas, linhas de créditos agrícolas e outros incentivos que ofereçam seguro e garantias financeiro-orçamentárias aos produtores rurais.

Apêndice 1. Lista de respondentes

Segue abaixo a lista de respondentes ao questionário e suas respectivas instituições.

Respondentes (questionário)	Organização
Alessandro Samuel-Rosa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Alex McBratney	University of Sydney
Alfred Hartemink	University of Wisconsin - Madison
Álvaro Vilela de Resende	Embrapa Milho e Sorgo
Angelo Costa Gurgel	Fundação Getulio Vargas
Antonio Roque Dechen	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - USP
Antonio Soares da Silva	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Budiman Minasny	The University of Sydney
Carlos Eduardo Pellegrino Cerri	ESALQ/USP
Ciro Antônio Rosolem	Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu
Cláudia Pozzi Jantalia	Embrapa Agrobiologia
David Roquetti Filho	ANDA - Associação Nacional Para Difusão de Adubos
Djalma Martinhão Gomes de Sousa	Embrapa Cerrados
Don Reicosky	Soil Scientist Emeritus, USDA-ARS
Éder de Souza Martins	Embrapa Cerrados
Edvaldo Guimarães	Morro Verde Fosfato
Elisangela M. Almeida	Empresa de Pesquisa Energética (EPE)
Eliseu Alves	Embrapa Sede
Eros Artur Bohac Francisco	NPCT - Nutrição de Plantas Ciência e Tecnologia
Everaldo Zonta	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
Fabiana Villa Alves	Embrapa Gado de Corte
Fábio Rubio Scarano	Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)
Fernando Carlos Becker	ABRACAL - Associação Brasileira dos Produtores de Calcário Agrícola (ABRACAL)
Flavia Cristina dos Santos	Embrapa Milho e Sorgo
Gabriela Teixeira	Associação Pró-Gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul (AGEVAP)
Heitor Cantarella	Instituto Agronômico de Campinas

Hideraldo José Coelho	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa)
Ildefonso Pla Sentís	UNIVERSITAT DE LLEIDA-DEPARTMENT OF SOILS AND ENVIRONMENTAL SCIENCES
Iran Paz Pires	Instituto Floresta Tropical
Ivan Bergier	Embrapa Pantanal
Jean Paul Metzger	Universidade de São Paulo
Jefé Leão Ribeiro	CGCSA/DEPROS/SDI/MAPA
Jerônimo Sansevero	Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
José Everardo Torres Portugal	Secretaria de Estado da Produção Rural (SEPROR)
José Francisco da Cunha	Tec-fertil
Julian Dumanski	Senior Research Scientist (retired). Canada Dept. of Agriculture and Food; Senior Consultant, World Bank.
Lino Ricardo Rios Furia	Sirius Minerals
Luciano Colpo Gatiboni	North Carolina State University
Luis Ignacio Prochnow	NPCT
M.B. Kirkham	Kansas State University
Manuel Claudio Motta Macedo	Embrapa Gado de Corte
Marcel Bursztyn	Universidade de Brasília
Marcio Mattos de Mendonça	AS-PTA
Marco Ripoli	Ag Entrepreneur / O Agro Não Para
Marcus A. M. de Vasconcelos	Embrapa Amazônia Oriental
Margareth Gonçalves Simões	Embrapa Solos
Maria da Conceição Santana Carvalho	Embrapa Arroz e Feijão
Mariangela Hungria da Cunha	Embrapa Soja
Marie Luise Carolina Bartz	Universidade de Coimbra & FEBRAPDP
Marquel Jonas Holzschuh	SLC Agricola
Nelson Ananias Filho	Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil-CNA

Nelson Horowitz	NH Consultorias Eirelli
Olafur Arnalds	Agricultural University of Iceland
Paulo Sérgio Pavinato	ESALQ/USP
Charles K.K. Gachene	University of Nairobi
Rafael de Souza Nunes	Embrapa Cerrados
Reinaldo Bertola Cantarutti	Universidade Federal de Viçosa
Renato Atanazio	Fundação Grupo Boticário
Richard Arnold	Retired from USDA NRCS, Soil Survey
Silvano Luiz de Abreu	Silvano Abreu Consultoria Agronomica

Apêndice 2. Questionário aplicado

QUESTIONÁRIO 1: SERVIÇOS AMBIENTAIS NO CONTEXTO DE POLÍTICAS PÚBLICAS E CERTIFICAÇÃO

1. Quais as principais tendências e sinais de futuro da temática serviços ambientais no contexto de políticas públicas e certificação?
2. Cite 3 oportunidades ou ameaças que poderão impactar esse tema nos próximos 10 anos.
3. Conhece alguma iniciativa ou estratégia sendo desenvolvida por stakeholders dessa área com potencial de impacto futuro?
4. Conhece algum case de sucesso em certificação ou rotulagem relacionadas à provisão de serviços ambientais? Descreva sucintamente.
5. Algum comentário que gostaria de compartilhar?

QUESTIONÁRIO 2: NOVOS INSUMOS FERTILIZANTES E CONDICIONADORES PARA SOLOS TROPICAIS

1. Quais as principais tendências tecnológicas em fertilizantes, condicionadores e novas fontes de nutrientes para solos tropicais nos próximos anos?
2. Quais as principais ameaças relacionadas ao mercado e também às novas tecnologias de fertilizantes e

condicionadores para o Brasil?

3. Qual deveria ser a estratégia brasileira para reduzir a dependência externa de fertilizantes?
4. Apostaria em alguma tecnologia com potencial disruptivo nos próximos dez anos?
5. Gostaria de comentar algum outro ponto de interesse (relacionado ao tema), que não tenha sido abordado acima?

QUESTIONÁRIO 3: PEDOLOGIA E PEDOMETRIA NO SÉCULO XXI

1. Quais as principais tendências e sinais [indícios de possíveis mudanças] de futuro para a área de Pedologia e Pedometria?
2. E quais as principais ameaças e oportunidades para a área de Pedologia e Pedometria?
3. Em quais ações a sua organização está investindo com potencial de impacto futuro nessa área?
4. Qual (is) tecnologia (s) poderá (ão) gerar inovações disruptivas na Pedologia e Pedometria?
5. Como você vê o futuro da Pedologia e Pedometria?
6. Algum comentário adicional?

QUESTIONÁRIO 4: REINSERÇÃO DE TERRAS DEGRADADAS AO SISTEMA DE PRODUÇÃO- SETOR PRODUTIVO

1. Quais são os principais entraves, oportunidades e ameaças para a reinserção de terras degradadas aos sistemas de produção agropecuários?
2. O que será necessário em termos de políticas públicas e tecnologias para viabilizar a reinserção de terras degradadas aos sistemas produtivos agropecuários, nos próximos 20 anos?
3. Quais estratégias ou projeto estão sendo desenvolvidas com relevante potencial de impacto futuro?

QUESTIONÁRIO 5: REINSERÇÃO DE TERRAS DEGRADADAS AO SISTEMA DE PRODUÇÃO - ACADEMIA

1. Para que seja possível reinserir parte significativa das terras degradadas aos sistemas produtivos agropecuários nos próximos 20 anos, o que será necessário em termos de pesquisa, desenvolvimento e inovação?
2. Quais os desafios, oportunidades e ameaças para que a pesquisa agropecuária brasileira possa apoiar esse processo?
3. Quais as tendências tecnológicas que podem apoiar programas de recuperação de terras degradadas visando sua reinserção ao sistema produtivo?
4. Quais estratégias de atores e organizações nessa temática chamam a sua atenção pelo potencial de impacto futuro?
5. Você conhece alguma experiência exitosa de PD&I, no Brasil ou no exterior, relacionadas à recuperação e reinserção de terras degradadas?

QUESTIONÁRIO 6: REINSERÇÃO DE TERRAS DEGRADADAS AO SISTEMA DE PRODUÇÃO - GOVERNO

1. Para que seja possível reinserir parte significativa das terras degradadas aos sistemas produtivos agropecuários brasileiros nos próximos 20 anos, quais políticas públicas precisarão ser implementadas?
2. Quais os principais entraves para a implementação dessas políticas públicas?
3. Quais seriam os principais atores para a implementação dessas políticas públicas?
4. Quais seriam as estratégias desses atores com maior potencial para a implementação dessas políticas públicas?
5. Quais as principais oportunidades e vantagens que o país pode obter com a implementação dessas políticas para a reinserção de terras degradadas?